

运行于区块链上的智能分布式电力能源系统： 需求、概念、方法以及展望

张俊¹ 高文忠¹ 张应晨² 郑心湖³ 杨柳青⁴ 郝君¹ 戴潇潇¹

摘要 智能分布式电力能源系统 (Intelligent distributed, electrical energy systems, IDEES) 具有组件种类繁多, 数量庞大, 管理困难, 利润低微等特点, 导致传统中心化的运营管理不再适合此类系统, 而区块链技术可能是推行大规模分布式智能电力能源系统重要的技术路径. 由于电力能源系统是一种具有社会和技术双重属性的系统, 从而注定了其在用区块链实现运行时, 必然需要多种区块链来描述和建模其不同的属性, 在文中称之为“区块链群”. 具体来说, 从底层到高层, 这个区块链群由分布式数据存储与服务区块链、智能资产管理区块链、电力系统分析区块链、智能合约运营区块链和智能电力交易支付区块链组成. 基于区块链技术、分布式文件服务技术、分布式电力系统分析与管理技术, 这些不同层次和功能的区块链自我组织、互相协助, 最后形成一个分布式自主的电力能源运行系统. 在此复杂系统中, 频繁而深度的计算与交互衍生出系统智能, 笔者期望这种智能将促成稳定、可靠、有效的电力能源生产、传输与消费.

关键词 区块链, 分布式电力系统, 可再生能源, 分布式智能系统

引用格式 张俊, 高文忠, 张应晨, 郑心湖, 杨柳青, 郝君, 戴潇潇. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544–1554

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160744

Blockchain Based Intelligent Distributed Electrical Energy Systems: Needs, Concepts, Approaches and Vision

ZHANG Jun¹ GAO Wen-Zhong¹ ZHANG Ying-Chen² ZHENG Xin-Hu³ YANG Liu-Qing⁴
HAO Jun¹ DAI Xiao-Xiao¹

Abstract Intelligent distributed electrical energy systems (IDEES) are featured by vast system components, diversified component types, and difficulties in operation and management, which results in that the traditional centralized power system management approach no longer fits the operation. Thus, it is believed that the blockchain technology is one of the important feasible technical paths for building future large-scale distributed electrical energy systems. An IDEES is inherently with both social and technical characteristics, as a result, a distributed electrical energy system needs to be divided into multiple layers, and at each layer, a blockchain is utilized to model and manage its logic and physical functionalities. The blockchains at different layers coordinate with each other and achieve successful operation of the IDEES. Specifically, the multi-layer blockchains, named “blockchain group”, consist of distributed data access and service blockchain, intelligent property management blockchain, power system analysis blockchain, intelligent contract operation blockchain, and intelligent electricity trading blockchain. It is expected that the blockchain group can be self-organized into a complex, autonomous and distributed IDEES. In this complex system, frequent and in-depth interactions and computing will derive intelligence, and it is expected that such intelligence can bring stable, reliable and efficient electrical energy production, transmission and consumption.

Key words Blockchain, distributed electrical energy systems, renewable energy, distributed intelligent systems

Citation Zhang Jun, Gao Wen-Zhong, Zhang Ying-Chen, Zheng Xin-Hu, Yang Liu-Qing, Hao Jun, Dai Xiao-Xiao. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(9): 1544–1554

收稿日期 2016-10-30 录用日期 2017-03-21
Manuscript received October 30, 2016; accepted March 21, 2017
本文责任编辑 王飞跃

Recommended by Associate Editor WANG Fei-Yue

1. 丹佛大学里奇工程与计算机科学学院电气与计算机工程系 丹佛 80210 美国 2. 国立可再生能源实验室 戈尔登 80401 美国 3. 明尼苏达州立大学计算机科学与工程系 明尼阿波利斯 55414 美国 4. 科罗拉多州立大学电气与计算机工程系 科林斯堡 80523 美国

1. Department of Electrical and Computer Engineering, Ritchie

School of Engineering and Computer Science, University of Denver, Denver 80210, USA 2. National Renewable Energy Laboratory, Golden 80401, USA 3. Department of Computer Science and Engineering, University of Minnesota, Minneapolis 55414, USA 4. Department of Electrical and Computer Engineering, Colorado State University, Fort Collins 80523, USA

1 引言

1.1 区块链技术与发展历程

区块链, 是一种全网共识共同维护且保有所有历史交易数据的分布式数据库。其所采用的时间戳、非对称加密、分布式共识、可灵活编程等技术使其具备了去中心化、时间可追溯性、自治性、开放性以及信息不可篡改等特性。区块链技术的基本构架大致可以分为 6 层, 即涵括所有基层信息数据和加密技术等的数据层、连接所有节点完成数据传播以及验证的网络层、涵括各种共识算法与机制的共识层、制定奖励与惩罚的激励层、封装算法和智能合约的合约层、以及具体化区块链应用场景的应用层^[1]。

作为加密虚拟货币体系比特币的核心支撑技术而诞生的区块链, 自 2008 年诞生至今已经吸引了众多来自各个领域的学者, 并逐渐衍生出了许多不同于其初衷的应用^[2]。对于区块链技术发展进程的描述, 尽管存在不同的观点, 最为普遍流传的共识是将其划分为三个起点不同却并行发展的阶段, 即以虚拟加密货币为中心的区块链 1.0, 服务于金融领域以智能合约为中心的区块链 2.0, 以及将区块链应用拓展到各个领域的区块链 3.0^[3]。起步最早且至今发展最为完善的当属区块链 1.0, 尽管现今各行各业的研究者提出了各种各样的设想, 并试图使区块链摆脱虚拟货币而应用于其他的领域。目前大家谈论与研究的理论基础仍然建立在为比特币服务的区块链技术之上。

在区块链 1.0 发展阶段, 比特币是当之无愧的主角。PayPal、微软 Microsoft、戴尔 Dell 等电子商务网站相继接受比特币作为支付方式。德国政府更是在 2013 年第一个承认了比特币的合法货币地位。比特币一时间曾达到每个价格 1242 美元, 甚至更高于当天黄金每盎司的价格。除去最广为人知的比特币 Bitcoin、瑞波币 Ripple、莱特币 Litecoin 等, 现在可查的虚拟货币已达到 600 多种, 合计市场价值达到 68 亿美元^[4]。如果说区块链 1.0 实现的是虚拟货币的流通和交易, 区块链 2.0 则是利用在区块链交易中无须信用的特性, 并通过智能合约将区块链技术引入了更多的金融交易中。智能合约与传统合约最大的差别在于, 智能合约的履行是在预设条件发生的情况下由代码强制自动执行的, 没有信用问题, 完全不需要第三方的参与。期权交易、众筹、债券、基金、年金、无须信用的借贷等都是区块链可以大有作为的领域^[5-6]。而区块链 3.0 进一步拓宽了区块链的应用范围, 凡是去中心化的、需要第三方监管、有触发条件的、需要溯源却又需要保护隐私的点对点的“交易”(资产或非资产、有形或无形),

均可由区块链来完成。其可能的应用包括智能实物资产交易(房产、古董交易等)、无形资产管理(版权、专利等)、公共记录(土地和产权变更记录、车辆登记、营业执照等)、证件登记(身份证、驾驶证等)、私人记录(健康记录、遗嘱等)等。如果说区块链对上述列出的领域将起到的只是提高与优化效率、可靠性、公开性等的作用, 那么对于分布式电力能源系统, 区块链技术则是为其提供了一条重要的可行的技术路径。

1.2 分布式电力能源系统简介

传统发电站都是集中式的大型发电站, 因为环保、生产成本等原因通常需要长距离输电才能送达用户, 如火力发电站、核电站、水电站和大型风力发电。大电网、高压电、大机组是传统供电系统的特点。传统集中式供电系统产能效率高且便于管理, 然而长距离输电配电过程中能量的耗散也非常之大, 系统的容错率较低, 且灵活性小。传统电网一旦出现故障, 其影响范围广、难修复、损失大, 如近期出现的印度大停电、巴西大停电和美加大停电。分布式电力能源系统利用自然、地理、能源分布的特点在当地小规模发电, 就地供电, 灵活性极高, 且能积极响应用户需求, 为偏远地区供电难的问题提供了解决方案。分布式电力能源系统是可以满足日常用电需求的小型电力能源与传统电力系统高度融合的产物, 所以分布式能源增强了传统电网系统的可靠性并且为用电用户提供了多种选择。

再者, 人类对环境保护的愈加重视, 以及为其而制定的相关政策法规使得风、光等可再生能源在能源系统中所占的比例越来越大。可再生能源有多种定义方式, 目前被广泛接受的定义是: 可再生能源是来自大自然的能源, 例如风能、太阳能和潮汐能等, 相较于石油和煤炭等不可再生能源, 可再生能源是一种取之不尽、用之不竭, 会自动再生的能源。随着太阳能发电技术、风力发电技术的不断发展, 此类新能源发电成本不断降低, 使得太阳能发电和风力发电目前以分布式新能源发电的形式被广泛运用于社区、家庭发电^[7]。因此, 分布式能源又可以降低排放密度、减少对环境的影响, 例如: 美国能源部 Renewable and Distributed Systems Integration (RDSI) 项目的目标是减少 15% 的高峰负荷^[8]。

由于分布式能源高效、占用空间小、维护费用低, 使得分布式电力能源进入家家户户成为可能。分布式电力能源的广泛应用和电网系统的逐步现代化将加速智能电网的发展。可再生能源的广泛运用、家庭发电传统的电能消费者开始具备了供电的能力(Prosumer)、电动车的使用也得到越来越多人的认

可与重视, 这些现象与事实都使得分布式电力能源系统成为了必然趋势且亟待完善.

1.3 分布式电力能源系统与区块链

然而, 由于分布式智能电力能源系统的自身特点, 许多的难题也使其发展遇到了困境. 首先, 分布式发电的类型繁多、发电能力不一、数量庞大、并且地理分布分散, 以至于人工管理、调度、维护非常困难. 再者风、光等新能源的发电量完全依仗自然条件, 不可准确预测, 且不稳定, 再加上设备投入与维护费用, 使得其利润低微甚至无法保障. 这两大难题使得中心化的供电管理无法建立, 或是不愿意去建立此类系统. 然而系统的建立只是最初步的问题, 如果这样的系统能成功建立并且连入电网投入使用, 系统的运营又是另一大难题: 如何审核与发放入网许可; 在接入新用户时如何保证电网整体的安全与稳定; 如何与传统输发电合作; 如何与电力公司分摊利益; 如何与所有用户互动; 如何保证网内电能交易的公平、公正与公开; 如何确保交易执行; 如何合理地分配电能与制定价格, 使得用户的需求得到满足、利益得到保障; 如何高效合理地利用资源; 如何在收集用户信息的同时保障其隐私不被侵犯等问题都极

大地制约了分布式电力能源系统的推广与发展.

区块链的特点可以概括为: 分布式的、自治的或共同约定的、按照合约执行的、可追溯的^[9]. 区块链的去中心化特性与分布式电力系统的去中心化构造不谋而合. 区块链中不存在一个中心化的主导节点, 每个节点地位平等并通过共识机制自动自发地共同维护, 对应了分布式能源系统中用户共同协作实现自适应调度的需求; 区块链中每个节点都分享存储所有历史数据, 数据以时序链接, 但数据只对有限权的节点可见, 此特性若应用在分布式能源系统中则解决了交易公平公正公开, 同时又保护隐私的问题; 而区块链中可灵活编程的智能合约则对应解决了系统分析和交易执行的问题.

基于上述分布式智能电力系统和区块链的特点, 本文提出了如图 1 所演示的一种基于区块链群的实现方式, 以及依存于其上的分布式智能电力能源系统数据服务、资产服务、系统分析、资源规划与优化、自主运营和智能支付等机制. 区块链群中的每个区块链都执行相应的逻辑或物理功能, 而且互相依赖和交互. 在下一节, 对此区块链群进行了具体描述.



图 1 分布式智能电力能源系统区块链群: 架构与分层功能

Fig. 1 Blockchain groups in intelligent distributed electrical energy systems: architecture and functionality

2 区块链群的架构与分层功能

服务于分布式电力能源系统的区块链群由可独立运行的、完成不同功能的5个区块链组成,分别为:数据区块链、资产区块链、分析区块链、运营区块链以及支付区块链。本节系统分析了这5个区块链各自的功能作用和构架方式,以及如何使其相互交互用以实现分布式智能电力能源系统。

2.1 分布式数据存储与服务区块链(数据区块链)

智能电力能源系统数据根据数据来源不同可分为两大类,一类是电网内部数据,另一类是电网外部数据。电网内部数据分为两类,静态数据和动态数据。静态数据包括变化不频繁的有关电网资产的数据、电网设备连接关系、用户资料等。静态数据来自电网地理信息管理系统、资产管理系统和用户管理系统等。电网动态数据又分为电网运行数据和电网营销数据。电网运行数据包括来自AMI(Advanced metering infrastructure)、SCADA(Supervisory control and data acquisition)、PMU(Phasor measurement)等系统的电网遥测数据、来自各种设备监测系统的数据、来自电表管理系统的用电数据、来自电网警报系统的事件数据、来自网络检修程序的数据、来自用户和社交网络的数据、来自各巡查设备的数据等。而电网营销数据则包括交易电价、用电计划、交易合同等^[10]。

分布式数据存储与服务区块链(下文简称数据区块链)封装了智能电力系统底层数据存储与读取信息,以及相应的数据加密信息,为分布式数据计算提供数据存储和运算基础。区块链群中其他链将会运用数据区块链来进行数据交互。数据区块链控制分布式文件系统并且向外部提供读写接口。区块链群中各个区块链从数据区块链提供的数据接口读取自己所需的数据,而运行结果则写进数据区块链,从而建立各个区块链的交互机制。在此交互机制基础上,各区块链完成自己预定的功能,比如,智能资产管理区块链将最新的系统资产关系和资产状况写进数据区块链;电力系统分析区块链读取电网传感数据和电网系统的拓扑结构,从而确认系统各节点的潮流计算结果,而分布式潮流计算的结果被写回数据区块链。利用数据区块链中的潮流分析结果,智能合约运营区块链可获取电能输送机制及当前供需平衡状况、利用封装在其中的算法进行经济计算和能源分配。电力能源运营结果和数据会被写到数据区块链中,基于这些数据支付区块链确定和结算每个用户和发电设备的经济效益。

数据区块链为智能电力系统的运行提供了一种新的分布式数据存储、通信以及文件服务架构。数

据区块链中的节点本身并不存储所有的实际数据,而是包含部分数据、各种数据的类型信息、存取位置信息、版本信息、读取权限信息、读写历史信息等。数据区块链的信息将电网大数据串联起来,且为其提供安全的存取机制,保留存取记录,让每次数据的变更都有据可查,防止第三方恶意篡改数据引起安全问题。另外,数据区块链对智能电力系统提供文件服务,用户可通过数据区块链确认文件版本,保证分布式文件的完整性和正确性。在这些方面现有的产品举例为Storj^[11]和IPFS^[12-13]。以IPFS为例说明数据区块链工作原理。IPFS基于Kademlia分布式哈希表(Distributed Hash table, DHT)方法来存储数据。分布式哈希表不仅选择性地在区块链节点中复制数据,而且也在节点中复制数据的存储信息。具体来说,当数据被上载到IPFS时,数据被拷贝到一定数量的节点中,因此,即使某个节点失效,数据也不会损失。当此数据系统运行时,当有越多的节点下载数据时,数据系统就越有韧性。IPFS采用merkleDAG来为用户提供DHT的结构和数据定位功能。merkleDAG是一种用于连接各个节点的有向无圈图数据结构。当有数据上载到IPFS时,文件系统生成产生一对SHA-256公私密钥并交付用户,用于加密数据和识别身份。

数据区块链可以理解为电网大数据的“账本”,为智能电力系统的运行和运营提供数据支持和文件服务工程。更重要的是,利用区块链自身的安全属性,其为电力系统数据安全提供了一种全新的数据架构思路与技术路径。

2.2 智能资产管理区块链(资产区块链)

智能电力系统的资产包括:自动保护装置、智能电表及高级量测系统、可控/可监管的逆变器、能源管理系统及其操控系统、配电自动化设备、配电管理系统、电网错误检测设备、设备健康监控传感器、容错限流器、负载监控、微电网控制器、变压器、相角测量器、智能电器和设备(用户端)、输电线路及网络、电力系统分析软件系统、高带宽通信系统、电动汽车、电车充电设备、微型发电设备(用户端,包括PV(Photovoltaic)、风机、微型燃气轮机、微型常规发电机等)^[14]。在未来的智能电力系统里,以上资产可能属于不同的所有者,比如供电公司、用户、社会团体,甚至第三方电力系统运营公司。对如此庞杂的资产系统,低成本分布式管理是一项巨大的挑战。当前区块链技术可以被用于各类型资产的管理、登记、注册、交易和投资。区块链可以被应用的领域非常广泛,从无形的数字货币、金融产品到有形的资产管理都可以通过区块链技术去实现。区块链技术

的分布式资产管理功能为未来智能微电网的管理提供了一个可行的良好解决方案。

基于区块链的智能资产管理是一个全新的概念,它实现了大规模的分布式“无信任”加密控制的资产管理机制和系统。举个例子,由此为基础,“无信任”资产网络使得“无信任”租赁或转移机制变得可行。在“无信任”网络中,由于基于区块链的智能资产机制可以有效防止欺诈与中间费用,资产交易成本将变得非常低廉。更重要的是,这种机制不需要交易各方互相认可和信任,就可以自动自主执行,而且可以有效减少交易争端,其原因如下。

智能电力系统中的每个资产都可以在区块链中注册,这些有形和无形的资产(包括数据、软件、算法资产)被相应的拥有私钥的用户或组织管理和控制。但是对拥有私钥的用户或组织来说,他们的操作又必须遵守储存在资产链共识层和合约层的规则,通过区块链来实现的分布式资产管理,可以很好地将每笔资产交易所涉及的用户、设备、价格、交易状态记录并保存。同时,在区块链的帮助下,分布式资产管理可以更加灵活、简便。在智能电力系统中的每个用户不需要在现实生活中熟识对方便可进行资产交易而无须担心欺诈行为,因为每笔交易都是严格在所有节点监督下按照区块链合约来执行,在交易达成并且结算之后,区块链会自动将该资产对应的密钥从旧所有人名下转到新所有人名下,并在整个区块链声明。例如,用户 C 想要购买或租赁用户 D 的太阳能发电装置,一旦双方交易达成,区块链便会将这个太阳能发电装置对应的密钥转给用户 C 并在全网声明,未来这个太阳能装置所产生的电能将由用户 C 支配。这样的资产管理方式是简单的、易行的,用户不需要第三方的介入就可以实现资产管理和买卖,因为所有条约都已写入区块链程序强制执行。用户可以通过智能终端,如智能手机就实现对其名下所拥有资产的交易。

现有的分布式资产交易系统的例子包括 Stellar 和 Melon 协议^[13]。Stellar 是基于 Ripple 交易机制的区块链资产交易系统,Stellar 通过可信任的第三方取得共识来进行资产交易,此第三方可以是银行或者中心交易机构,甚至是可信任的某节点。因此,Stellar 并非一个完全去中心化的系统,它拥有一个中心化的共识机制。这种非完全去中心化的系统并非理想系统,但是也有它的优点,即可问责性。在 Stellar 系统模型中,担任中心交易共识责任的机构对所有的交易事故负责,如果交易事故发生,此中心化机构将会被问责或者其担保资格会下降。Melon 协议则是一个基于以太坊平台的数字资产管理协议。它可以用完全去中心化的方式实现对数字资产的设

置、管理和投资,为分布式资产管理提供了较成熟的解决方案。介于该类系统已于现实中实现并投入使用,且技术成熟,其具体构建方法不在此累述。

2.3 电力系统分析区块链(分析区块链)

电力系统分析和状态估计(Power system analysis and state estimation, PSASE)是智能电力系统运营及管理的基础。电力系统状态估计可为基于分布式能源的智能电力系统进行状态分析,从而为智能系统运行提供控制和决策的依据。

智能分布式电网具有很大数量的电力系统组件,比如分布式能源、发电机和用户负荷等,因此,中心化的状态估计方法已经不能胜任其应用需求。取而代之的是分布式的状态估计方法,即将整个电网进行分割形成若干区域,各个区域进行独立的本地状态估计,而本地状态估计的结果通过电网相关的通信手段传输给电网管理系统,由管理系统整合归并为一个统一的状态估计结果^[15-16]。在本节讨论的目标即是如何用区块链技术实现分布式状态估计以及相应的整合归并。下文描述一种电力状态分析区块链,依托于文献[1]提出的6层结构来叙述相关技术方案。

1) 数据层:电力系统分析区块链需要依据“数据区块链”中电力系统大数据的信息以获取电力系统各个观测传感器读数、用户能源消费读数、发电状态读数以及其他电力系统状态量;需要读取“资产区块链”提供的数据以获得最新的电力网络资产信息,包括分布式发电机、负荷、网络拓扑信息等。电力系统状态估计链本身的数据包括分析得出的各个网络节点状态估计量。

2) 网络层:分析区块链的节点即是分布式系统状态分析服务器,每一服务器负责对于一个电力系统分区的分析。服务器之间以安全的网络通信机制组网。

3) 共识层:将整个电网进行分割形成若干区域,各个区域进行独立的本地状态估计,而本地状态估计的结果通过电网相关的通信手段传输给管理系统,由管理系统整合归并为一个统一的状态估计结果,而这些分区之间有互相交叠的区域,即各个划分的区间之间存在有冗余度。这样,在区域归并的时候可以用重叠的区域进行互相验证以达成共识、识别攻击和增强系统安全性。

4) 激励层:每台参与系统分析的服务器都会从网络运营收入中得到相应的报酬;而参与系统整合和归并的服务器,将得到更多的报酬。

5) 合约层:在合约层,分析数据链封装了分布式电力系统状态估计的算法与机制。电力系统分布

式状态估计主要要解决以下问题: 区域分割、本地状态估计、电压相角归并以及电压幅值协调. 区域分割在共识层完成, 在分割时, 要保证各个临近区域互有重叠, 这样, 在区域归并的时候可以用重叠的区域进行互相验证以达成共识、识别攻击和增强系统安全性. 进行本地状态估计时, 需考虑到相角的归并和电压幅值的协调, 结合这些系统协调算法, 以加权最小二乘法区域算法为核心, 可以有效地抵抗数据干扰和提高运算效率.

电力系统分析区块链为分布式系统状态估计提供了可行的技术平台、实现方法、运营手段和重要结果. 为自组织的智能电力系统运行提供了重要技术基础.

2.4 智能合约运营区块链 (运营区块链)

基于“数据区块链”、“资产区块链”和“分析区块链”, 分布式智能电力系统的“智能合约运营区块链”(运营区块链)可以实现自动化、智能化的电力能源系统协同运行.

自动化、智能化的电力能源系统协同运行可以通过集中式控制或者分布式控制来实现. 对于分布式智能电力系统, 由于其组件数量庞大, 而且为了保证其可扩展性, 分布式控制成为首选的控制方式. 多代理系统 (Multi-agent system) 为其提供了理论基础, 包括可互相协调的控制算法、代理间通信机制以及整个系统组织结构^[17-18]. 代理系统的描述是基于其存在论和数据模型. 存在论代表了概念集合及概念之间联系的知识. 代理运用存在论提供的电力能源系统知识来互相传递消息、组织请求和应答、完成和执行相应的控制动作. 能源与电力系统社区已经开发了相应的存在论模型, 比如 IEC 61970^[19], 在此标准中定义了智能电网能源管理系统数据交换规范以及相关应用. IEC 61970 中通用信息模型 (Common information model, CIM) 定义了所有电力系统运营中重要的对象、它们的描述、属性信息以及相互关系. IEC 61970 并非完整的存在论模型, 比如其不具备存在论模型需要的完备的通信语言, 但是 IEC 61970 已经为存在论模型开发提供了良好的基础. 以 6 层区块链模型为基础, 建立运营区块链的技术路径如下:

1) 在运营层区块链上的节点集对应实际物理实体, 如发电机、可控负荷、传输网络、储能系统等; 也可以是虚拟代理, 比如卖方代理和买方代理. 每个代理遵循其指定的智能合约, 判断当前电力网络和自身运行条件、做出判断以及采取相应行动.

2) 数据层: 电力系统运营区块链需要读取“分析区块链”的运行结果以获取当前网络运行状态, 当

有必要时, 读取“数据区块链”中电力系统各个观测传感器读数、用户能源消费读数、发电状态读数以及其他电力系统状态量; 需要读取“资产区块链”提供的数据以获得最新的电力网络资产信息, 包括分布式发电机、负荷、网络拓扑等资产信息.

3) 网络层: 运营区块链的节点既可能是物理节点也可能是虚拟节点, 分散在电力系统的各个物理空间或网络空间中.

4) 共识层: 当某个代理将执行某项行动时, 网络各个节点会检验该行动是否符合该代理的行为规定, 即智能合约, 取得共识后, 该代理即可实施这次行动.

5) 激励层: 每个参与的代理都会自动获取相关的利益: 买卖电双方实现等价交换、用户通过可控负荷达到更高的舒适度或者节约能源费用等.

6) 合约层: 在合约层, 运营数据链封装了分布式电力运行的算法与机制, 在接下来的段落中详细讨论.

智能电力系统的分布式协同算法的难点在于可扩展性, 即如何在合理的时间内实现对大量节点的协调. 当前主要的智能电力系统协同算法包括拍卖算法、多代理启发式强化学习算法、基于博弈论和市场模型的算法等.

以博弈论算法为例, 下文阐述在区块链环境下智能电力系统的协同运行. 博弈论研究在相互竞争的情景下, 多个参与者如何交互的问题^[20]. 其目标是要确认整个系统的均衡状态, 在此状态下, 事前定义的系统利益被最优化. 在区块链环境中, 基于博弈论的协同运作以如下方法开展. 参与者: 参与者是博弈中的决策主体. 参与人以某种方式选择自己的行动, 获取最大化的收益. 参与者在区块链中的载体即是运营区块链节点, 逻辑上载体即是多代理系统 (Multi-agent system, MAS) 中的代理. 以博弈论为基础的运营包括以下元素^[21].

信息: 信息是指参与者在博弈过程中可得到的知识. 每一个参与者在决策之前根据其他参与者的知识和了解到的有关情况做出自己的最佳选择. 信息的分享通过区块链网络通信机制实现.

策略: 策略是参与者对其他参与者的行动作出反应的行动规则. 策略即是封装在区块链中的智能合约的主体. 在完全信息的博弈中, 各区块链节点都保留其余各节点的策略, 因此各节点的行为都可被其余节点验证, 从而保证系统安全运行.

收益: 收益是在某特定的策略组合下参与者得到的利益, 它是策略组合的函数. 收益的计算方法是智能合约的一部分, 也是激励各个节点的奖励方式.

均衡: 均衡是所有参与者的最优策略组合, 是区

区块链各节点最后达成的共识,也是网络运营的目标和当前协同运行的终点。

从上可知,以多代理理论为基础的智能电力系统协同运营,如以博弈论为基础运营,和区块链的6层结构高度契合。因此,为基于区块链的智能分布式电力能源系统中的架构建立提供了理想的理论和应用基础。

2.5 智能电力交易支付区块链(支付区块链)

区块链技术发源于比特币,是一种天然的去中心化的支付平台,然而,当它被应用于电力系统支付的时候,尤其是点对点支付方式时,必须考虑到电力系统自身特点,即电力系统网络是一个受电压电流物理定律控制和限制的网络,在其运营期间,需要通过电力系统分析手段确立合理正确的能源使用费用、过网费用、损耗费用以及管理费用等。而这所有的费用都和电力系统潮流分析密切相关。在当今的技术条件下,大规模使用潮流控制设备并非很现实,因此,比较可行的方案是采用潮流跟踪方法,确定各个用户对各个系统资源的占用,包括各发电资源和输电资源,从而确定发电费和过网费。潮流跟踪方法是建立在比例共享原则的基本假设基础上,可以实现电网中潮流的解耦分析,建立了各个发电单元和负荷单元的发电和用电一对一的关系^[22]。基于类似思想,Kirschen提出了另外一种潮流跟踪的方法,不同点在于比例共享是基于节点组而非节点^[23]。潮流跟踪方法可以为智能电力系统运行解决以下问题:1)潮流跟踪精确度的提高,比如网损的确定和无功功率不同的处理方法^[24];2)在电力市场中的应用,比如发电费用、过网费用、无功定价等^[25]。

映射到区块链6层模型,下文提出的支付区块链模型叙述如下。首先,在支付区块链中,有两类节点,第一类是计算节点,负责解潮流跟踪问题。另一类是交易节点,负责点对点资金的支付与收取,以支撑电力交易和用户电费交易。

1) 数据层:支付区块链需要读取分析区块链产生的电力系统分析结果,需要读取资产区块链产生的资产所有权信息,并利用其结果进一步确认潮流跟踪结果。根据潮流跟踪结果以及定价机制,交易节点进行点对点的支付。

2) 网络层:支付区块链的计算节点是若干分散在电力系统的各个物理空间或网络空间中的服务器,并行地解潮流跟踪问题。交易节点即各交易实体,比如分布式发电单元与负荷等。

3) 共识层:各计算节点服务器解出潮流跟踪问题后,对结果进行互相校验,在一定容错误差内的结果保留,否则结果被丢弃。检验结果即取得的共识。

交易节点的共识机制与比特币相似。

4) 激励层:每个参与的计算节点服务器都会获得电费账单记账权以及相关服务费用。

5) 合约层:在合约层,分析数据链封装了潮流跟踪的算法与机制,从而产生发电费用、过网费用、无功定价。而交易节点则根据计算出的账单支出或收取相应的费用。

支付区块链为智能电力系统提供实时点对点支付的技术方案以及类似比特币的安全支付机制。支付区块链的分析结果包括各个运营实体的分账方式和结果、支出和收入账本,以及最后交易的方案与结果。

2.6 各个区块链之间的交互

分布式能源的并网运行给智能电网带来许多新的问题和挑战,例如:如何根据当前能源产生情况实时对电网资源进行最优化规划;如何根据电网大数据实时分析网络运行状况;如何保证电力系统中交易的合理、公平、公正;如何保证低成本高效监管和监督电网的安全运行;如何保证交易各方平等、自由。这些问题和挑战都可以在本文提出的区块链群中得到合理的解决方案。

在文中提出的区块链群中,各区块链独立运行,区块链群中各个区块链是模块化关系,不需要在一个统一的平台上统一实现。在区块链群中每个区块链,只要系统可提供其所需数据及其接口,该区块链即可独立运行。因此,只要能保证“互可操作性”(Interoperability),各个区块链可并行进行研发。各个区块链通过数据区块链的文件服务接口从分布式文件系统读取其所需的输入数据,而后将分布式运用结果通过此文件服务接口写进数据区块链。通过数据区块链及其分布式文件服务接口,实现各个区块链之间的数据共享、信息交换和行动交互。该交互机制如图2所示。具体来说电力系统分析区块链读取“数据区块链”中电力系统大数据的信息以获取电力系统各个观测传感器读数、用户能源消费读数、发电状态读数以及其他电力系统状态量;读取“资产区块链”的数据以获得最新的电力网络资产信息,包括分布式发电机、负荷、网络拓扑信息等。电力系统状态估计链生成的数据包括分析得出的各个网络节点状态估计量。电力系统运营区块链读取“分析区块链”的运行结果以获取当前网络运行状态;读取“数据区块链”以获取电力系统各个观测传感器读数、用户能源消费读数、发电状态读数以及其他电力系统状态量;读取“资产区块链”的数据以获得最新的电力网络资产信息,包括分布式发电机、负荷、网络拓扑等资产信息。支付区块链读取“分析

区块链”产生的电力系统分析结果, 需要读取“资产区块链”的资产所有权信息, 并利用其结果进一步确认潮流跟踪结果. 根据潮流跟踪结果以及定价机制, 交易节点进行点对点的支付.

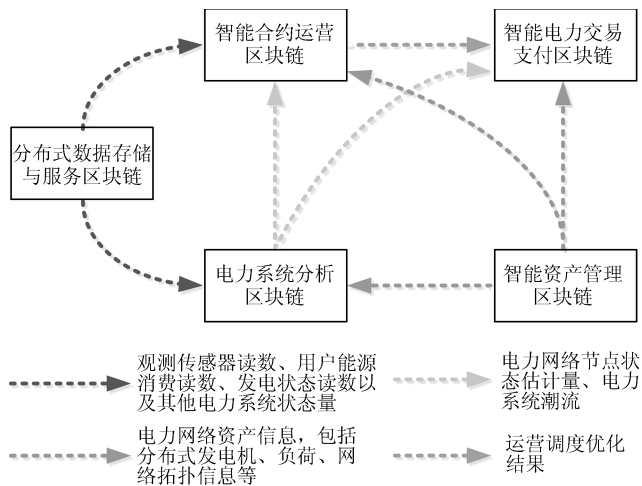


图2 区块链信息交互示意图

Fig. 2 Information interactions within the blockchains

以上技术方案机理解释如下. 在分布式文件服务系统的基础上, 分布式区块链应用, 如资产管理、电力系统分析、运营管理和交易支付可运行在虚拟机 (Virtual machine) 上, 如 Heroku 和 astralboot^[13]. 虚拟机隔离操作系统和物理机器的底层硬件, 在虚拟机上, 可运行 Node, Ruby, Java, PHP, Python, Go, Scala 或 Clojure 等多种语言编写的程序, 并提供操作系统和数据库接口支持. 以太坊也提供自己的虚拟机 EVM (Ethereum virtual machine), 但是 EVM 并不能和外部数据源直接接口, 除非外部数据源已经设置了和以太坊的数据接口, 因此大大限制了 EVM 的应用.

例如, 在某段时间内, 电网中的用户想要将其所拥有的可再生能源发电机产生的能源以合理的价格卖给其他网内用户, 并且在此期间要保证全网能源资源最优化配置以及电力系统稳定运行. 要解决这个问题, 区块链群中各个区块链需要互相交互协同以完成既定目标. 在区块链群的数据层, 各区块链提供或产生传感数据、资产数据、电网分析数据、运营数据等供各区块链协同运行. 在区块链层的网络层, 各个通信节点和区块数据服务器提供实时可靠的通信机制. 在共识层, 各种共识机制协同工作, 如传统的工作量证明 (Proof of work, POW)、权益证明 (Proof of stake, POS), 利用冗余电力系统分析结果互相验证、多代理智能代码内嵌验证机制、多节点的潮流跟踪相互验证等. 在激励层, 根据一定的激励模式, 每个参与电力系统协同运营的数据和计

算服务器都会获得相关服务费用. 在合约层, 各种智能数据管理、资产管理、状态估计、规划、运营、支付算法被封装在各运行节点内, 各个区块链运行过程和结果被写进相应的数据区块链分布式文件中.

3 结论

下一代分布式智能电力系统具有组件种类繁多, 数量庞大, 管理困难, 利润低微等特点. 根据这些特点, 本文提出了一个新的区块链群的概念和技术, 为其提供了分布式支付系统、分布式资源分配系统、和分布式智能系统实现平台. 以上特点正是分布式电力能源系统所需要完成的核心任务: 资源的分配, 复杂系统运行以及支付解决方案. 区块链群呈现一种多层次形态, 在不同的层次上有不同的区块链模型对此层次的系统进行描述以及管理, 多层次的区块链互相协助, 实现实际电力能源系统的分布式运行. 具体来说, 从底层到高层, 这个区块链群包含分布式数据存储与服务区块链、智能资产管理区块链、电力系统分析区块链、智能合约运营区块链、智能电力交易支付区块链. 区块链群中的每个区块链都执行相应的逻辑或者物理功能, 而且互相依赖和交互. 区块链技术为这样的复杂系统提供了一个实现平台, 在此实现平台上, 各个物理或者逻辑结点 (或者“代理”) 在不同的区块链上协同工作, 实现自身的逻辑功能. 而区块链技术则保证了该多层次分布式系统的完整性、安全性以及鲁棒性. 本文预期这种系统可以形成一个“思想的社会”^[26]. 支持智能电力能源系统的运行. 在区块链 3.0 之后, 区块链技术将与现代智能技术加速融合从而形成新的技术浪潮. 区块链技术将从单纯的分布式支付技术 (Bitcoin)、智能合约技术 (Smart contract)、去中心化应用技术 (Decentralized application systems)、去中心化自主组织技术 (Decentralized autonomous organizations), 发展到基于区块链的更深层次的智能化管控技术. 比如基于平行系统思想和 ACP (Artificial, computational and parallel) 方法^[27] 的平行区块链管控技术; 遵从于默顿定律的、基于 DPP (Description, prediction, and prescription, 描述、预测、诱导) 思想^[28] 的平行动态规划技术 (Parallel dynamic programming)^[29] 等, 这些新的思想与技术将引导和驱动区块链所承载的系统, 从而达到管控者所期望的状态. 希望本文所提出的区块链群的概念是对即将来临的区块链智能化管控技术的一次有益的探索.

本文提出的模型中尚未涉及到许多电力系统关键技术, 比如说故障检测识别与处理、暂态分析、稳定性分析、可靠性分析等, 期望在未来的工作中继续

探索, 实现这些功能在基于区块链的复杂分布式智能系统的运用与实现. 由这些不同层次和功能的区块链自我组织最后形成一个分布式自主的电力运行系统. 在此复杂系统中, 频繁而深度的计算与交互衍生出智能, 期望这种智能能够带来稳定、可靠、有效的电力能源产生、传递与消费.

References

- 1 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Blockchain: the state of the art and future trends. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(4): 481–494
(袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望. *自动化学报*, 2016, **42**(4): 481–494)
- 2 Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [Online], available: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, September 15, 2006
- 3 Swan M. *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2015.
- 4 谭磊, 陈刚. 区块链 2.0. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- 5 Wang X M. Blockchain 2.0: smart contract [Online], available: <http://www.8btc.com/blockchain-smart-contract>, 2016.
- 6 安全客. 从比特币到智能合约, 区块链到底能给我们带来什么? [Online], available: <http://bobao.360.cn/news/detail/3432.html>, September 15, 2016
- 7 Platt G, Berry A, Cornforth D. What role for microgrids? *Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy*. Waltham: Academic Press, 2012.
- 8 Cherian S. DER integration for peak load management DOE RDSI-city of Fort Collins, Colorado [Online], available: https://www.smartgrid.gov/files/DER_integration_for_Peak_Load_Management_DOE_RDSI_City_Fort_200807.pdf, September 15, 2016
- 9 Zhang Ning, Wang Yi, Kang Chong-Qing, Cheng Jiang-Nan, He Da-Wei. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications. *Proceedings of the CSEE*, 2016, **36**(15): 4011–4022
(张宁, 王毅, 康重庆, 称将南, 贺大玮. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探. *中国电机工程学报*, 2016, **36**(15): 4011–4022)
- 10 Liu Guang-Yi, Zhu Wen-Dong, Chen Jin-Xiang, Zhang Yi. Characteristics, application scenarios and analysis platform of smart grid big data. *Southern Power System Technology*, 2016, **10**(5): 102–110
(刘广一, 朱文东, 陈金翔, 张逸. 智能电网大数据的特点、应用场景与分析平台. *南方电网技术*, 2016, **10**(5): 102–110)
- 11 Storj Labs Inc [Online], available: <https://storj.io/>, September 15, 2016
- 12 Protocol Labs Inc [Online], available: <http://ipn.io>, September 15, 2016
- 13 Raval S. *Decentralized Applications: Harnessing Bitcoin's Blockchain Technology*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2016.
- 14 SmartGrid.gov. Smart grid asset descriptions [Online], available: https://www.smartgrid.gov/files/description_of_assets.pdf, September 15, 2016
- 15 Gómez-Expósito A, de la Villa Jaén A, Gómez-Quiles C, Rousseaux P, Van Cutsem T. A taxonomy of multi-area state estimation methods. *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**(4): 1060–1069
- 16 Korres G N. A distributed multiarea state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, **26**(1): 73–84
- 17 Bradshaw J M. *Software Agents*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1997.
- 18 Ferber J. *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Great Britain: Addison-Wesley, 1999.
- 19 Common Information Model (CIM)/Energy Management, International Electrotechnical Commission (IEC) Standard 61970, 2003.
- 20 Osborne M J, Rubinstein A. *A Course in Game Theory*. Cambridge, MA: MIT Press, 1994.
- 21 Fan Ru-Guo, Han Min-Chun. *Game Theory*. Wuhan, China: Wuhan University Press, 2006.
(范如国, 韩民春. 博弈论. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.)
- 22 Bialek J. Tracing the flow of electricity. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 1996, **143**(4): 313–320
- 23 Kirschen D, Allan R, Strbac G. Contributions of individual generators to loads and flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, **12**(1): 52–60
- 24 Kirschen D, Strbac G. Tracing active and reactive power between generators and loads using real and imaginary currents. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, **14**(4): 1312–1319
- 25 Bialek J. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, **12**(3): 1185–1193
- 26 Minsky M. *The Society of Mind*. New York, USA: Simon and Schuster, 1986.
- 27 Wang Fei-Yue. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(4): 25–35
(王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统—关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. *复杂系统与复杂性科学*, 2004, **1**(4): 25–35)
- 28 Merton R K. The unanticipated consequences of purposive social action. *American Sociological Review*, 1936, **1**(6): 894–904
- 29 Wang F Y, Zhang J, Wei Q L, Zheng X H, Li L. PDP: parallel dynamic programming. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(1): 1–5



张俊 美国科罗拉多丹佛大学电气与计算机工程系副教授. 2003 年和 2005 年分别获得华中科技大学电气工程系学士与硕士学位. 2008 年获得亚利桑那州立大学电气工程博士学位. 主要研究方向为传感理论, 信号处理和实现, 时变系统建模, 及其在智能电力和能源系统中的应用. 他撰写并共同出版了 70 多篇同行评议的出版物. 他是第 48 届北美电力研讨会联合技术主席 (NAPS 2016). 本文通信作者. E-mail: jun.zhang@du.edu
(ZHANG Jun Associate professor in the Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver, USA. He received his bachelor and master degrees in Electrical Engineering from Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China in 2003 and 2005, respectively, and his Ph.D. in Electrical Engineering from Arizona State University, USA in 2008. His research interesting covers sensing theory, signal processing and implementation, time-varying system modeling, and their applications in intelligent power and energy systems. He authored/coauthored over 70 peer reviewed publications and

he is the Technical Co-Chair for the 48th North American Power Symposium (NAPS 2016). Corresponding author of this paper.)



高文忠 美国科罗拉多丹佛大学电气与计算机工程系副教授。1999 年和 2002 年获得美国佐治亚理工大学电气与计算机工程学院电力工程硕士和博士学位。主要研究方向为可再生能源和分布式发电, 微电网, 智能电网, 电力系统保护, 电力系统中电力电子的应用, 电力系统建模与仿真, 混合电动推进系统。同时, 他还是

IEEE Transactions on Sustainable Energy 杂志的编辑, 也是 *IEEE Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 杂志的副主编。他是 2016 年第四十八届北美电力研讨会 (48th North American Power Symposium) 和 2012 年 IEEE 电力电子与风机研讨会 (IEEE Symposium on Power Electronics and Machines in Wind Applications) 的主席。

E-mail: wenzhong.gao@du.edu

(**GAO Wen-Zhong** Associate professor in the Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver, Colorado, USA. He received his master and Ph. D. degrees in Electrical and Computer Engineering, specializing in electric power engineering, from Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA in 1999 and 2002, respectively. His research interest covers renewable energy and distributed generation, microgrid, smart grid, power system protection, power electronics applications in power systems, power system modeling and simulation, and hybrid electric propulsion systems. He is an editor of *IEEE Transactions on Sustainable Energy* and an associate editor of *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. He is the General Chair for the 48th North American Power Symposium (NAPS 2016) and the IEEE Symposium on Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA 2012).)



张应晨 美国国立可再生能源实验室高级工程师, 美国丹佛大学客座研究副教授。2003 年获得天津大学授予的学士学位, 2010 年获得弗吉尼亚理工学院暨州立大学授予的博士学位。主要研究方向为未来电网的先进能源管理系统, 大规模可再生能源整合对电力系统运行的影响, 对具有高可再生能源渗透率系统的稳定性

监测和分析, 以及同步相量测量技术在可再生能源接入中的应用。他是多项美国国家能源部和国立可再生能源实验室资助的新能源相关课题的课题组组长。他有 10 年以上在电力系统运行和规划, 可再生一体化, 传感和监测领域的工作经验。他共同撰写出版了 50 多篇同行评审的出版物, 并持有一项美国专利。E-mail: Yingchen.Zhang@nrel.gov

(**ZHANG Ying-Chen** Senior engineer at the National Renewable Energy Laboratory and a visiting research assistant professor at the University of Denver. He received

his bachelor degree from Tianjin University, China in 2003 and his Ph. D. degree from Virginia Polytechnic Institute and State University, USA in 2010. His research interest covers advanced energy management system for future grids, the impact of large-scale integration of renewable energies on power system operations, stability monitoring and analysis of a system with high renewable penetration, and synchrophasor measurements' applications on renewable integrations. He is the principal investigator on several Department of Energy and National Renewable Energy Laboratory sponsored projects focusing on wind and solar integration. He has over 10 years of experience in power industry in the areas of power system operation and planning, renewable integration, sensing and monitoring. He authored/coauthored over 50 peer reviewed publications and holds one U. S. patent.)



郑心湖 美国科罗拉多州科林斯堡科罗拉多州立大学计算机科学与工程学院博士研究生。2011 年获得浙江大学控制科学与工程学院本科学位。主要研究方向包括社会计算, 机器学习, 数据分析。

E-mail: zheng473@umn.edu

(**ZHENG Xin-Hu** Ph. D. candidate in computer science and engineering with Colorado State University, Fort Collins, CO, USA. He received his bachelor degree in control science and engineering from the Zhejiang University of China, Hangzhou, China, in 2011. His research interest covers include social computing, machine learning, and data analytics.)



杨柳青 2004 年获得美国明尼苏达大学博士学位。主要研究方向为通信和信号处理。杨柳青博士一直活跃在学术界, 她组织了多次 IEEE 国际会议, 并且是许多杂志的编委成员, 包括: *IEEE Transactions on Communications*, *the IEEE Transactions on Wireless Communications*, *the IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 以及 *IEEE Transactions on Signal Processing*。她在 2007 年曾获得过由美国海军办公室颁发的杰出青年研究员奖, 在 2009 年获得了美国国家科学基金会职业奖, 在 2010 年获得了 IEEE 全球通信杰出服务奖, 在 2012 年获得了 George T. Abell 杰出中职教师奖, 分别于 2012 年和 2016 年获得了由科罗拉多州立大学颁发的 Ary Corey 杰出国际贡献奖, 同时也在 IEEE ICUWB, ICC, ITSC GLOBECOM, ICC WCSP 等期刊多次获得最佳论文奖。E-mail: lqyang@engr.colostate.edu

(**YANG Liu-Qing** She received her Ph. D. degree from the University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, in 2004. Her research interest covers communications and signal processing. Dr. Yang has been actively serving in the technical community, including the organization of many IEEE international conferences, and on the edito-

rial boards of a number of journals, including the *IEEE Transactions on Communications*, the *IEEE Transactions on Wireless Communications*, the *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, and the *IEEE Transactions on Signal Processing*. She received the Office of Naval Research Young Investigator Program Award in 2007, the National Science Foundation Career Award in 2009, the IEEE GLOBECOM Outstanding Service Award in 2010, the George T. Abell Outstanding Mid-Career Faculty Award and the Art Corey Outstanding International Contributions Award at CSU in 2012 and 2016 respectively, and Best Paper Awards at IEEE ICUWB' 06, ICC' 13, ITSC' 14, GLOBECOM' 14, ICC'16, and WCSP' 16.)



郝 君 美国科罗拉多州丹佛大学电气与计算机工程系博士研究生. 2015 年获得美国科罗拉多州丹佛大学电气与计算机工程系获得电气和计算机工程硕士学位. 主要研究方向为电力工程.

E-mail: jun.hao@du.edu

(HAO Jun Ph.D. candidate at University of Denver, majoring in electric power engineering. He received his master degree in electric

cal and computer engineering, specializing in electric power engineering from University of Denver, Colorado, USA, in 2015. His main research interest is electric power engineering.)



戴潇潇 美国科罗拉多州丹佛大学电气与计算机工程系博士研究生. 2013 年获得丹佛大学电气与计算机工程系电气和计算机工程硕士学位. 2011 年获得吉林大学与俄罗斯托木斯克理工大学共同授予的电子工程学士学位. 主要研究方向为传感, 机器学习, 信号处理, 系统分析. E-mail: xiaoxiao.dai@du.edu

(DAI Xiao-Xiao Ph.D candidate at the Ritchie School of Engineering and Computer Science, University of Denver, Denver, USA. She received her master degree in Electrical Engineering from the Ritchie School of Engineering and Computer Science, University of Denver, Denver, USA in 2013, her bachelor degree in Electronics and Microelectronics from Jilin University, Changchun, China, and from National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia in 2011. Her research interest covers sensing, machine learning, signal processing, and network analysis.)