

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.08.006

边云链协同技术在能源互联网数据管理中的应用及展望

Application and prospect of edge-cloud-chain collaboration technologies
for energy internet data management

鄢晶^{1,2},高天露²,张俊²,王旭³

YAN Jing^{1,2},GAO Tianlu²,ZHANG Jun²,WANG Xu³

(1.国网湖北省电力有限公司经济技术研究院,武汉 430077; 2.武汉大学 电气与自动化学院,武汉 430072;
3.中国科学院数学与系统科学研究院,北京 100190)

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Economics and Technology Research Institute, Wuhan 430077, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Academy of
Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要:针对能源互联网数据的安全共享、高效利用及增值问题展开综述。首先分析了能源互联网数据管理面临的挑战,然后梳理了当前能源互联网数据管理的弊端和应对策略,在此基础上对包括边云协调技术、区块链技术、知识自动化技术、通证经济、数据估值等方面的技术和理论展开总结和分析,进而提出了基于边云链协同技术的解决方案,包括数据管理架构、数据知识化与共享机制以及数据运营体系构建,最后对相关领域的研究进行了展望,可为能源互联网数据共享与数据运营的实现提供技术支持。

关键词:能源互联网;数据共享;数据运营;边云链协同;区块链;边缘计算;人工智能;云计算;通证经济;数据估值
中图分类号:TK 01.9;TP 301.6;TP 311.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)08-0041-07

Abstract: We summarized the problems in secured sharing, efficient and value-added utilization of energy internet data. Firstly, the challenges faced by energy internet data management were analyzed. Then, the problems and countermeasures for current energy internet data management were given. Base on the analysis above, the technologies and theories including edge-cloud collaboration technology, blockchain technology, intellectual knowledge, Token Economy and data evaluation were anatomized. A solution based on edge-cloud-chain collaboration technology was proposed, which included construction of data management architecture, intellectual data, data sharing mechanism and operation system. Finally, the study on related fields was made to provide technical support for the energy internet data sharing and operation.

Keywords: energy internet; data sharing; data operation; edge-cloud-chain collaboration; blockchain; edge computing; AI; cloud computing; Token Economy; data evaluation

0 引言

随着互联网数字经济的发展,数据作为一种新型的生产要素,为我国经济发展提供了全新动能。能源互联网覆盖能源生产、能源传输、能源交易、能源消费各个环节,涉及数以亿计的设备 and 系统,这些设备和系统在规划与运行过程中产生了大量的数据,如何通过区块链^[1-3]、边缘计算^[4-5]、人工智能以及云计算^[6-8]等高新技术为能源互联网数据管理赋能,有效提高能源数据可信度,促进多能流数据融合,实现数字资产化,推进数据共享交易并充分

挖掘数据价值,已成为以数字革命驱动能源革命,建设运营好世界一流能源互联网企业的关键问题之一。

本文在对能源互联网数据管理进行概述的基础上,分析了现阶段数据管理过程中存在的问题与挑战,基于边云链协同关键技术构建“数据-业务-价值”耦合的能源数据全过程管理体系,最后探讨了构建基于激励机制的能源数据运营方案。

1 能源互联网数据管理面临的挑战

能源互联网是以互联网技术为基础,横向联动电-热-气异质能,纵向贯通源-网-荷-储并将能量流、信息流与业务流进行三流合一的能源服务网

收稿日期:2020-07-02;修回日期:2020-08-10

络^[9-10]。随着智能传感监测与信息化建设的发展,各类能源在全寿命周期各环节的数据信息存储下来,形成了海量多元异构的能源大数据。然而,多节点参与、多类型存储、复杂且快速增长的数据不仅对传统的数据综合分析及评估运用方法提出了挑战,还对能源互联网企业在业务决策、数据融合以及数据增值服务等方面提出了更高、更迫切的要求。与此同时,能源互联网中业务种类繁多,不同业务的复杂程度和计算量级有很大区别,如某些轻量级业务仅由单一数据源即可完成快速分析决策,而较复杂的业务则需要更全面丰富的数据及更高级的智能分析算法才能给出反馈或响应。

鉴于此,通过研究边缘计算、云计算、区块链等共性关键技术,构建基于边云链协同的能源互联网数据管理架构,建立去中心化人工智能评估、交易平台,以应对当前能源互联网数据管理发展中面临的机遇和挑战^[11]。

2 能源互联网数据管理现状

2.1 当前能源互联网数据管理弊端

随着智能传感监测与信息化建设速度的加快,包含能源生产、传输、消费等环节的数据信息形成了能源大数据,为构建实时、高效、准确的能源互联网系统提供了丰富的数据源。能源互联网系统是一个典型的多节点分布式网络,以电能为例,从生产至消费经过了多个环节,每个环节都涉及大量的数据分析与计算。

以电网某业务为例,系统结构分为电网终端、本地子站、本地主站和电网调度中心4个层面,海量数据经过逐层上传、计算后再依次返回计算结果。一方面,核心网络带宽不足会引起网络时延问题;另一方面,部分隐私数据直接上传存在隐私泄露风险:系统响应延迟和网络安全问题都可能引起决策失误,造成重大损失^[12]。

2.2 应对策略

针对2.1章节提出的各类弊端,可采用边云链协同技术进行处理。其中,边缘计算靠近数据端,将云计算的计算、存储功能下沉到网络边缘侧,能够快速处理电网产生的海量数据,提供最近端服务。采用人工智能技术处理数据能更好地保证处理效果,挖掘数据信息,实现边缘的智能化。配合先进的通信技术并结合区块链技术,能够保证数据传输、存储安全可靠,数据处理的每个过程都能被清楚地记录下来。云计算作为最终的数据管理平台,能够进行大数据分析管理。

运用区块链技术的能源互联网数据共享与运

营具有去中心化、公开透明、不可篡改等特性,可以解决当前中心化机构普遍存在的成本高、效率低和数据存储不安全等问题,更加符合能源互联网数据管理的场景与应用^[13-14]。

3 相关技术研究、应用现状

3.1 边云协调技术

文献[15]通过利用设备、边缘节点和云服务器之间的垂直协作以及边缘节点之间的水平协作来构建一个协作的3层计算网络。该方案提出了一个并行优化框架,将大规模问题分解为若干个较小的子问题,这些子问题以并行方式跨多个计算单元完成计算,以加快计算速度。文献[16]针对终端的动态性、边缘设施能力受限、边缘与终端邻近、云中心功能强和距离远的特征,融合云计算、对等(P2P)计算、客户端/服务器(C/S)与网格计算模式,构建多层自适应的统一计算模型,实现对应用场景的动态匹配;构建资源和用户的身份信任、行为信任评价机制,形成综合信任评估体系与模型,实现资源在终端、边缘、云中心3层级可信共享和优化利用。文献[17]提出了一种基于遗传算法算子的自适应离散粒子群优化算法(GA-DPSO),用于优化科学 workflow 数据放置时的数据传输时间。该方法不但考虑了边缘计算与云计算相结合的数据布局特点,同时还考虑了影响传输延迟的因素,如数据中心之间的带宽、边缘数据中心的数量和边缘数据中心的存储容量。试验结果表明,基于GA-DPSO的数据放置策略结合了边缘计算和云计算的特点,可以有效降低 workflow 执行过程中的数据传输时间。文献[18]提出了一种同时考虑网络时延和计算时延的物联网工作任务分配方案,即物联网用户的请求更有可能被分配给距离更近、负载更轻的边缘端并根据不同应用程序的工作负载动态调整计算资源,从而减少所有请求的计算延迟和响应时间,仿真结果验证了该方案的有效性。

3.2 区块链技术

文献[19]提出了一个基于区块链的电网大数据数字资产管理架构,通过切实可行的区块链技术,解决电网数据收集难、存储难、安全共享难等问题,实现去中心化、去信任、数据难以篡改的数据管理。文献[20]搭建了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的区块链群,研究了基于区块链技术的分布式自主电力能源运行系统架构。文献[21]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。文献[22]研究了分布式智能电网能源交易中不依赖可信第三方的交易安全问题,使用区块链技术、多签名和匿名加密消息流实现了分布式能源交易系统的概念验证,使同行能够匿名协商能源价格并安全地执行交易。

3.3 知识自动化技术

知识型工作是对知识的利用和创造,是具备知识的人或系统才能完成的工作,是生产有用信息和知识的创造性脑力劳动^[23]。彼得·德鲁克曾经把新的商业世界描绘为一个“知识社会”,在这个社会中,知识是关键资源,而知识工作者则是劳动力中的主导群体。德鲁克认为,在未来的10年里,知识工作者中最重要的新生力量将会出现在一个新群体中,称之为“知识技工”。知识型工作在当代社会分工中占有压倒性的重要地位,其核心要求是完成实时分析、科学决策、精准执行的复杂任务,因此,新型的知识工作者对未来的经济发展至关重要。关于知识自动化,业界认为主要是指知识型工作的自动化。工业生产过程知识自动化系统是将人工智能技术、计算机技术、自动化系统技术融合,以实现工业环境下自动感知、处理、计算、决策的智能系统^[24]。

知识驱动自动化(KDA)是利用知识工程技术获取过程知识,并采用知识熔接技术实现产品开发、设计、仿真、试验和制造的自动化^[25-27]。计算机和网络的兴起,开启了网络虚拟空间的信息自动化,在互联网时代,大多数过程不再是完全基于物理世界,而是基于信息物理系统(CPS)的虚拟网络世界与现实物理世界的融合,包括软件和算法的数据自动流动规则体系的建立。在大数据和互联网时代,知识自动化是互联网信息自动化的自然延伸与提高,是从物理世界的自动化控制转向虚拟空间的自动化。信息自动化实现了文件的远程传输、远程协同及信息处理,但无法处理复杂系统庞杂的、种类繁多的信号、参数、数据和信息。相比于信息自动化时代仅着眼于信息的传递交流,知识自动化可以结合复杂系统的人工系统+计算实验+平行执行(ACP)理论方法,利用大数据、机器学习和认知计算等更加智能地处理数据,实现数据、信息、知识、智能和智慧转化,形成具有意义的洞见,支持个人和组织完成以前无法完成的事情,比如更深入地理解世界的运转方式、预测行为的后果并制定更

好的决策。

3.4 通证经济

通证经济学是一个通过干涉手段促进行为改变的系统方法,经过数年的演变,这套方法对复杂环境、多种社会行为以及个人行为均十分有效。在经济学理论中,通证经济体系是一个与增强有关的复杂系统,增强物可以作为交换的媒介来购买物资、服务、权限等。1971年Skinner提出了增强理论作为通证经济体系的理论基础,该理论认为某种行为的产生受某种结果的影响,因此适当的奖励可能左右他人的行为。通证经济体系正是利用这一原理,用一种本来不具有增强作用的物体(如电力货币等)为表征,让它与具有增强作用的其他刺激物(如食品、服务、美元等)相联结,使这一种表征物变成具有增强力量的东西。徐忠和邹传伟在中国人民银行工作论文《区块链能做什么、不能做什么?》中将通证视为区块链的核心经济要素。

BUMO、启赋资本、创业邦、币世界、EnChain、Asia(东京)、快知实验室、Astar Lab 区块链实验室、Calypso Lab(硅谷)、加密谷以及温州市波普大数据研究院作为首批发起方,创建了通证经济时间联盟并谱写了《通证经济的模型与实践白皮书》,旨在讨论区块链商业落地与通证经济的模型,并提供一个通证经济设计与通证化改造的简要指引,供业界共同探讨并在实践中迭代。Steemit 博客平台作为最早的区块链项目之一,在平台中引入了较为复杂的通证设计,以形成鼓励内容贡献者的激励机制。

3.5 数据估值

目前,国外对数据价值的评估或者说对数据资产的评估主要集中在市场法的延伸与信息价值评价这2个层面。市场法的延伸主要是以市场法为基础对数据进行价值评估。Damodaran^[25]将公司的预期收益、收入、现金流和股票期权的影响加入对企业价值的综合评估中,还第1次将研发和营销的费用加入模型用来消除会计计量方式对企业价值评估的不良影响。Ho等^[26]在市场法的基础上进行改进,提出建立以数据包络分析法为基础的企业价值评估模型,对具有相似资产的公司修正其参数来得到所需评估企业的真正价值。Pigliapoco等^[27]建立了基于互联网企业价值链的评估模型,对以流量为基础的互联网企业进行分析评估。

国内对数据价值的评估研究主要集中在无形资产评估、管理以及网络数据资源评估等方面。陈久梅^[28]在无形资产未来收益的预测中使用了小波神经网络预测方法,提出用三角模糊数表示无形资产的经济寿命。余毓翔^[29]在对无形资产评估的研

究中,提出了一种计算高新技术企业整体资产价值的方法,简称割差法(企业无形资产=企业总体资产-有形货币资产)。窦娟^[30]对专利价值评估进行了模型研究,提出一种二项式期权模型,用来评估专利价值。赵静杰^[31]对知识资本价值评估进行了研究,在归纳知识资本涵义与特点的基础上,构建了一个知识资本价值测度模型。杨亚西等^[32]对实物期权定价方面进行了模型研究,构建了用于实物期权定价的模型,模型由 Black-Scholes (B-S) 模型、二叉树模型及其适用条件构成。李争艳^[33]在无形资产评估方面进行了理论研究,对无形资产的定义、属性、评估的前提条件进行了总结与归纳,提出了在收益法中运用无风险利率加风险补偿率法选取折现率。刘玉^[34]则将大数据资产分为主动获取和被动获取 2 种,前者采用历史成本法进行计量,后者采用现值法计量。张志刚等^[35]引入层次分析法模型构建指标评价体系(AHP)并利用层次分析法(YAAHP)计算数据资产各项评估指标权重,建立考虑成本和应用的资产价值评估模型,并将该模型应用于具体的数据资产价值评估。

4 基于边云链协同技术的解决方案

4.1 能源数据管理架构

基于边云链协同的能源数据管理架构如图 1 所示(图中:DTU 为配电终端单元;FTU 为馈线终端设备;TTU 为配电变压器远方终端),左边为整个边云

链协同下的能源互联网企业业务流程,右边为业务开展过程中能源数据的管理框架。

根据能源数据全过程管理及共享运营需求构建 3 层平台架构。

(1)在边缘侧部署算法,形成快速就地管控能力,完成轻量级业务反馈以及数据的知识化处理。

(2)在云端主站部署基于机器学习和深度学习框架的集中式数据计算,完成高价值密度的数据融合与应用级的数据分析,并实现对边云侧在数据存储、计算等方面的统一调度。

(3)基于分布式一致性算法和非对称加密技术,确保数据上云上链全过程的一致性与可信度,实现数据的隐私保护和安全共享。平台具备分布式智能以及各级智能协同自治的能力,可实现用户需求的快速决策和响应,最终实现数据、信息、知识、价值、共享的功能转换。

4.2 能源系统双向互动的边云协调机制

在上述能源数据管理框架下,梳理能源系统中不同能源网络端的数据结构与类型,通过分析不同能源网络节点中数据量以及处理难度来研究其算力分布特性;根据各类传输方法,进一步研究边缘节点和云端的交互模式,协调边缘侧完成轻量级业务反馈以及数据的知识化处理,云端完成高价值密度的数据融合与应用级的数据分析,实现对云端和边缘侧在数据存储、计算以及业务需求响应的统一调度,其协同框架如图 2 所示。

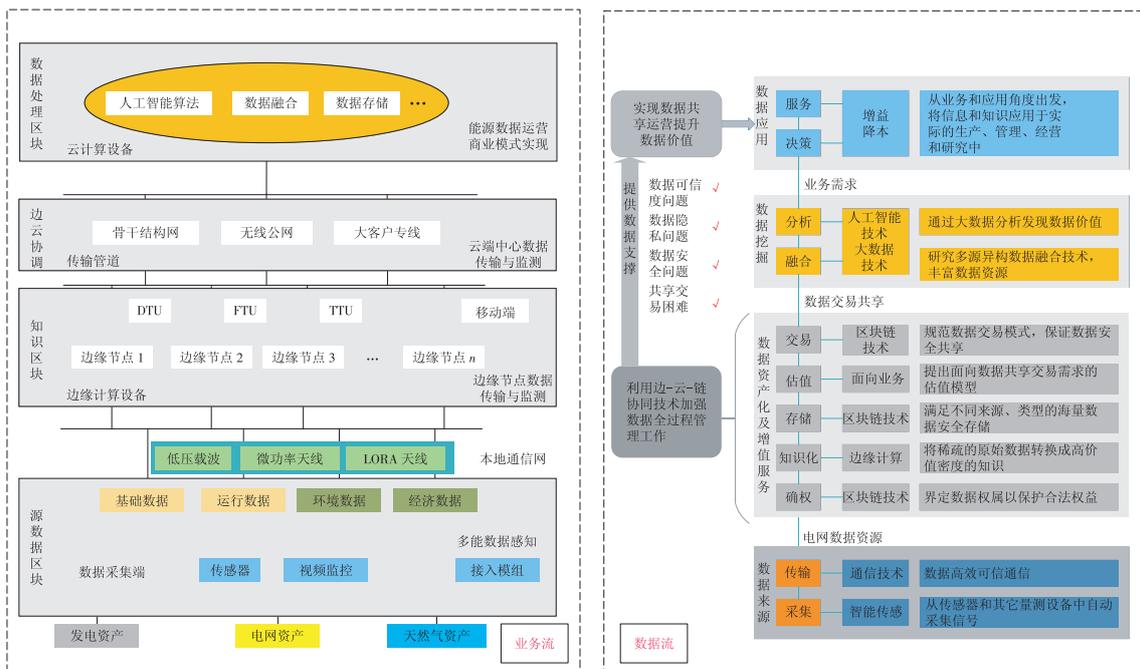


图 1 基于边云链协同的能源数据管理架构

Fig. 1 Energy internet data management framework based on edge-cloud-chain collaboration

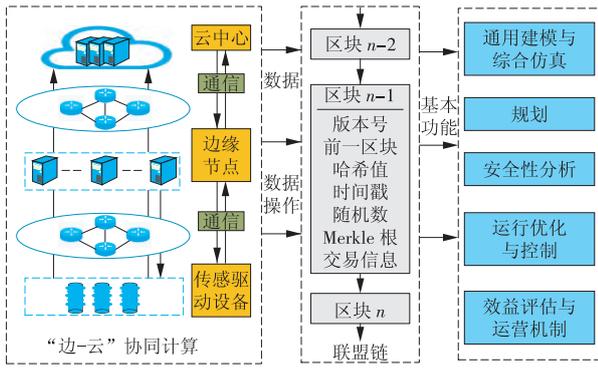


图 2 云-边-链协同框架

Fig. 2 Framework of edge-cloud-chain collaboration

针对从边缘侧上传到云端的高密度数据,基于分布式一致性算法和区块链中非对称加密技术,确保数据上云上链全过程的一致性与可信度,实现数据的隐私保护和共享;利用数据溯源技术和区块链中的智能合约技术,研究数据处理方式、所有权及其变更流程的共识机制,实现数据的可靠确权与安全可控。

4.3 能源数据知识化及共享机制

构建模块化、组件化、可配置的智能组件库,通过智能算法对智能合约库不断迭代更新,以训练智

能合约对不同任务的自动配置与优化能力,如图 3 所示。

当出现任务数据时,组件化智能合约会自动将其提取成初步知识,并结合联邦学习架构在保证数据隐私的前提下完成多方的知识挖掘与共享,训练得到的有效知识将会被智能合约用于学习和优化系统,最终进行知识的再创造。总体来说,基于区块链、智能组件和机器流程自动化技术,可智能分解复杂生产任务、支持协同训练、量化贡献、加密溯源的人工智能(AI)算法协作数据知识化及共享机制,有效解决能源数据跨系统共享难点。

4.4 能源数据运营体系构建

基于业务-价值耦合的能源数据运营体系框架如图 4 所示。以区块链作为能源互联网数据的存储和传输媒介,链接系统的边缘数据采集节点和数据处理中心通过边缘计算技术对数据进行本地处理,提高系统的快速反应能力,通过云计算技术对系统数据进行统一分析,确保系统的统筹管理能力。结合区块链的链式结构,构建基于通证经济的激励机制,设计通证的获取、兑换和流通方式,提高数据共享的有效性和价值密度。

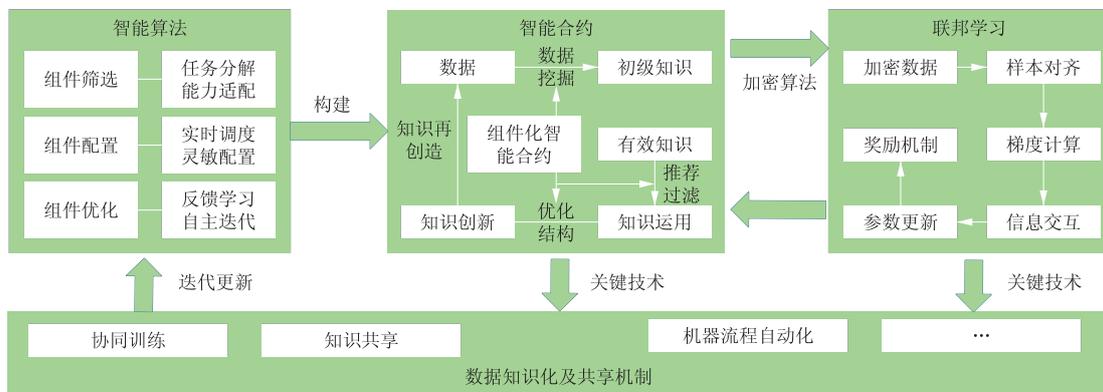


图 3 知识提取与知识共享架构流程

Fig. 3 Procedure of knowledge extraction and sharing

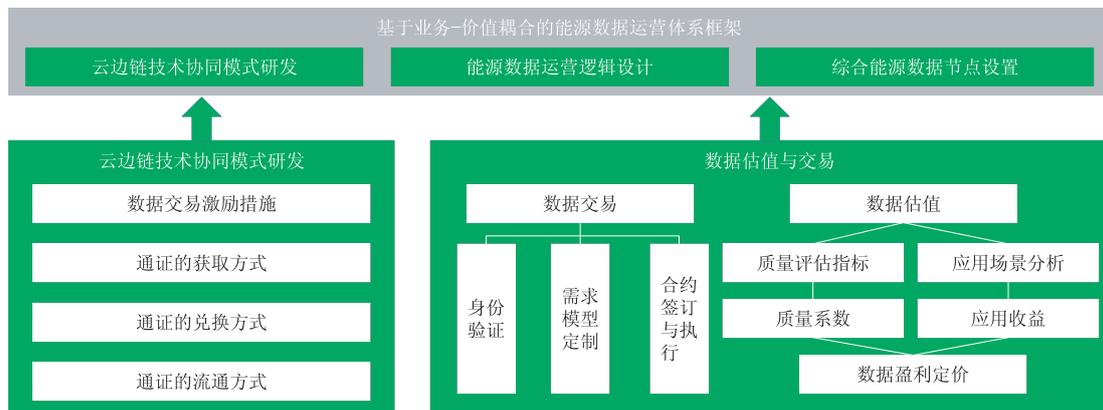


图 4 基于业务-价值耦合的能源数据运营体系框架

Fig. 4 Framework of energy data operation system based on business-value coupling

数据价值量化分为成本量化和收益量化 2 部分:收益量化是通过分析实际应用场景的收益得到收益预期值,同时考虑交易数据的质量系数,综合得到数据的收益性价格;数据成本量化即对数据的采集、存储和管理成本进行计算。数据的具体交易模式采用基于智能合约的区块链交易模式,通过身份验证实现数据交易准入机制的执行,根据数据需求的要求制定具体的需求模型并以智能合约的形式部署在区块链中,确保数据不出链处理,全程通过签订数据使用合约实现数据的交易。

5 展望

本文所述内容旨在促进数据、业务以及价值之间的关联耦合,推动基于数据-业务-价值耦合体系的能源互联网数据交易应用落地。通过区块链和智能合约技术可以自动制定和执行能源互联网系统中不同主体之间制定的数据交易规则,减少人为因素对交易流程的干预,提高数据交易效率。同时,采用智能合约定时提取数据购买方在实际业务中利用数据取得的具体利润,并按照既定比例自动收取费用的方式,实现数据、业务和价值间的关系耦合,促进数据在实际应用业务场景中的交易,为能源互联网企业拓宽主营业务提供技术支持。

参考文献:

- [1] MENGELKAMP E, NOTHEISEN B, BEER C, et al. A blockchain-based smart grid: Towards sustainable local energy markets [J]. *Computer Science: Research and Development*, 2018, 33 (1-2): 207-214.
- [2] PATEL P, PATEL H. Review of blockchain technology to address various security issues in cloud computing [M]// KOTTECHA K, PIURI V, SHAH H, et al. *Data Science and Intelligent Applications*. Singapore: Springer, 2021.
- [3] WU Jiani, NGUYEN Tran. Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview [J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3067.
- [4] WANG S, ZAFER M, LEUNG K K. Online placement of multi-component applications in edge computing environments [J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 2514-2533.
- [5] LI M, YU F R, SI P, et al. Energy-efficient M2M communications with mobile edge computing in virtualized cellular networks [C]// 2017 IEEE International Conference on Communications, 2017.
- [6] SHEN Zhidong, LI Li, YAN Fei, et al. Cloud computing system based on trusted computing platform [C]// 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010.
- [7] LEE Y, ZOMAYA A. Energy efficient utilization of resources in cloud computing systems [J]. *Journal of Supercomputing*, 2012, 60(2): 268-280.
- [8] LIU Di, ZHAO Libin. The research and implementation of cloud computing platform based on docker [C]// 2014 11th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), 2014: 475-478.
- [9] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望 [J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3005-3013.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: Driving force, review and outlook [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [10] 马守达, 杨锦成, 崔承刚, 等. 能源互联网储能技术应用研究 [J]. *发电技术*, 2018, 39(5): 412-418.
MA Shouda, YANG Jincheng, CUI Chenggang, et al. Research on application of energy storage technology in energy internet [J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(5): 412-418.
- [11] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法 [J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3630-3638.
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.
- [12] YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [13] GAO Tianlu, GAO Wei, ZHANG Jun, et al. Small-scale microgrid energy market based on PILT-DAO [C]// 2019 North American Power Symposium (NAPS), 2019.
- [14] CHEN Siyuan, BAI Yuyang, ZHANG Yinya, et al. A framework of decentralized electricity market based on the collaborative mechanism of blockchain and edge computing [C]// 2019 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, 2019: 219-223.
- [15] 邓晓衡, 关培源, 万志文, 等. 基于综合信任的边缘计算资源协同研究 [J]. *计算机研究与发展*, 2018, 55(3): 449-477.
DENG Xiaoheng, GUAN Peiyuan, WAN Zhiwen, et al. Integrated trust based resource cooperation in edge computing [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, 55(3): 449-477.
- [16] LIN B, ZHU F N, ZHANG J S, et al. A time-driven data placement strategy for a scientific workflow combining edge computing and cloud computing [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(7): 4254-4265.
- [17] FAN Q, ANSARI N. Application aware workload

- allocation for edge computing based IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3):2146-2153.
- [18]张俊,王飞跃.基于区块链的电网大数据数字资产管理架构[J].电力信息与通信技术,2018,16(8):1-7.
ZHANG Jun, WANG Feiyue. Digital asset management system architecture based on blockchain for power grid big data [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(8):1-7.
- [19]张俊,高文忠,张应晨,等.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[J].自动化学报,2017,43(9):1544-1554.
ZHANG Jun, GAO Wenzhong, ZHANG Yingchen, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: Needs, concepts, approaches and vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [20]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.
- [21]ZHUMABEKULY A N, SVETINOVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(5):840-852.
- [22]桂卫华,陈晓方,阳春华,等.知识自动化及工业应用[J].中国科学,2016,46(8):1016-1034.
GUI Weihua, CHEN Xiaofang, YANG Chunhua, et al. Knowledge automation and its industrial application [J]. Science China, 2016, 46(8):1016-1034.
- [23]ASTE T, TASCA P, MATTEO T D. Blockchain technologies: The foreseeable impact on society and industry[J]. Computer, 2017, 50(9):18-28.
- [24]WIKIPEDIA. Reinforcement theory [DB/OL]. [2020-07-01]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Reinforcement_theory&oldid=806054239.
- [25]DAMODARAN A. The dark side of valuation: Valuing young, distressed, and complex businesses [M]. Hoboken: Ft Press, 2009: 25-42.
- [26]HO C T, LIAO C K, KIM H T. Valuing Internet companies: A DEA-based multiple valuation approach[J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62(12):2097-2106.
- [27]PIGLIAPOCO E, BOGLIOLO A. A service-based model for the Internet value chain [C]//ACCESS 2013: International Conference on Access Networks, 2013:13-18.
- [28]陈久梅.无形资产评估理论、方法若干问题研究[D].西安:西安电子科技大学,2002.
- [29]余毓翔.高新技术企业无形资产评估方法的研究[D].成都:西南交通大学,2003.
- [30]窦娟.基于实物期权理论的信息技术领域专利价值评估[D].北京:北京交通大学,2010.
- [31]赵静杰.知识资本化理论研究[D].长春:吉林大学,2005.
- [32]杨亚西,杨波.实物期权法在无形资产价值评估中的应用[J].财会月刊,2009(21):40-42.
YANG Yaxi, YANG Bo. The application of real option method in intangible assets valuation [J]. Finance and Accounting Monthly, 2009(21):40-42.
- [33]李争艳.无形资产评估的收益法研究[D].大连:东北财经大学,2005.
- [34]刘玉.浅论大数据资产的确认与计量[J].商业会计,2014(18):3-4.
LIU Yu. Discussion on the recognition and measurement of big data assets [J]. Commercial Accounting, 2014(18):3-4.
- [35]张志刚,杨栋枢,吴红侠.数据资产价值评估模型研究与应用[J].现代电子技术,2015(20):44-47.
ZHANG Zhigang, YANG Dongshu, WU Hongxia. Research and application of data asset value assessment model [J]. Modern Electronics Technique, 2015(20):44-47.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

鄢晶(1989—),男,湖北荆州人,高级工程师,工程博士,从事能源互联网、人工智能等方面的研究(E-mail: jason.yan@whu.edu.cn)。

高天露(1994—),男,江西上饶人,工程师,工学硕士,从事人工智能、自然语言处理和区块链在电力系统运行分析和控制决策的应用等方面的研究。

张俊(1981—),男,湖北武汉人,教授,博士生导师,工学博士,从事智能系统、人工智能、知识自动化,及其在智能电力和能源系统中的应用等方面的研究。

王旭(1992—),男,山东菏泽人,工学博士,从事运筹学和区块链等方面的研究。