

边缘计算在电力系统供需互动应用的研究进展与展望¹

朱斌¹, 刘东¹, 刘天元¹, 王静², 王振尚², 唐文俊²²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240;
2. 电力科学研究院(深圳供电局有限公司), 广东省 深圳市 518000)

Research Progresses and Prospects on Application of Edge Computing in Power System Supply-demand Interaction³

ZHU Bin¹, LIU Dong¹, LIU Tianyuan¹, WANG Jing², WANG Zhenshang², TANG Wenjun²⁴

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University),⁵
Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute (Shenzhen Power Supply Co., Ltd.), Shenzhen 518000, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Supply-demand interaction can build a flexible energy regulation and control system through the information interaction between the demand and supply sides of the power system, which is a reliable guarantee for efficient and economical operation, an important feature of the new power system. With the continuous development of the power Internet of Things, the amount of data generated by power systems' supply and demand terminals is rising rapidly, and the traditional cloud computing architecture can hardly adapt to the growth of massive data processing demand. As an emerging computing paradigm, edge computing processes part of the data near the data source through devices with specific computing capabilities at the edge, which has the characteristics of low latency, high efficiency, and distribution. Applying edge computing to the field of power system supply-demand interaction can effectively improve the efficiency of interaction, enhance the security of data, and strengthen the flexibility of interaction. The paper first summarizes the development of edge computing in the power system, then describes the key technologies of edge computing applied to the field of supply-demand interaction, and finally provides an outlook on the future research prospects of edge computing and supply-demand interaction.⁶

KEY WORDS: edge computing; cloud computing; cloud-edge collaboration; supply-demand interaction; blockchain⁷

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22B2096); 南方电网公司科技项目(090000KK52210238)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (U22B2096); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (090000KK52210238).

摘要: 供需互动通过电力系统需求侧与供应侧的信息交互可构建灵活的能源调控体系, 是实现电力系统高效经济运行的可靠保障, 是新型电力系统的重要特征。随着电力物联网的不断发展, 电力系统供需终端所产生的数据量急速上升, 传统的云计算架构难以适应海量数据处理需求的增长。作为一种新兴的计算范式, 边缘计算通过边缘侧具备一定计算能力的设备在数据源附近就近处理部分数据, 具有低时延、高效率和分布式的特点。通过将边缘计算应用到电力系统供需互动领域, 可以有效提高供需互动的效率, 提升数据的安全性, 增强互动的灵活性。文中首先总结了边缘计算在电力系统中的发展现状, 然后阐述了边缘计算应用于供需互动领域的关键技术, 最后对边缘计算与供需互动在未来进一步的研究前景进行了展望。⁸

关键词: 边缘计算; 云计算; 云边协同; 供需互动; 区块链⁹

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0159¹⁰

0 引言¹¹

随着经济社会的飞速发展, 化石能源被大量开采, 其不可再生性及造成的污染问题促使人类推动能源改革, 建设清洁低碳、高效稳定的新型能源系统^[1]。为了提高电力系统运行效率, 缓解资源短缺问题, 促进环境、经济、社会的同步发展, 供需互动作为一种电力系统灵活调控方法得到了广泛的关注与应用^[2]。供需互动发挥作用的关键是在电力系统需求侧和供应侧之间进行信息互动与协同优化。在供应侧通过对分布式电源等灵活电源进行调度, 提高能源的使用效率; 需求侧则根据电网所提出的调节要求在合理范围内调节自身负荷, 从而换取一定的回报。供需互动可以在很大程度上提升电¹²

力系统灵活性,为电力供应商的电力调度与用户的用电规划提供了便利;也可以辅助维持电力系统的稳定,降低电网建设成本,提高电力系统运行的经济性^[3-4]。

近年来,随着电力物联网的发展与大量分布式能源接入电网,电网中的终端设备数量急速上升,这也使得电网产生的数据量大幅度增加^[5-6]。信息的准确处理是灵活供需互动的基础,而随着信息量的增加与信息源的分散化,有效实现供需互动变得愈加复杂与困难。供需互动在数据处理方面所面临的挑战主要包括以下几点:第一,需求侧潜力评估的数据处理。可调资源的可调节程度并不是一成不变的,其调节潜力受到环境、天气、人为事件等外部因素和自身负荷特性等内部因素的影响。潜力评估的结果影响到电力供应商的一系列后续调度动作和电力市场的价格,因此其评估的准确性具有重要意义。为此,需要为需求侧建立合适的潜力评估模型。潜力评估模型的建立需要用到多种数据处理方法,如数据动态管理^[7]、深度学习^[8]、不确定性评估^[9]等。这些方法都需要对需求侧数据进行多维度分析,从而提高潜力评估的精确性,因此这对电力系统的数据计算能力有着较高的要求。第二,分布式能源出力预测的数据处理。作为新型电力系统的重要组成部分,分布式能源具有巨大的互动潜力。而分布式能源出力具有不确定的特点,对其进行预测是电力供应端信息化的重要一环,其预测准确性也会影响电网供需互动的效果。目前,已有多重复杂的数据处理方法被用于分布式能源的出力预测,如聚类算法、神经网络等^[10-12],而依据这些算法建立预测模型需要大量的数据作为基础,因此分布式的出力预测同样需要电力系统提供高效快速的数据处理机制。第三,电力系统供需互动时的信息实时性与安全性。供需互动有效的关键在于需求信息与控制信息准确按时地传输至目标节点,而针对供需交互信息系统的网络攻击也成为了近年来针对电力系统的重要打击手段^[13]。为了在信息层面上对系统进行整体保护,需要调取部分数据计算资源来进行信息防护的相关工作。

目前,电力系统数据处理的主流方法是云计算。云计算通过云平台集成计算设备,形成云计算资源池。用户将数据上传至云端,云端完成计算后再将数据返回至用户侧^[14]。随着终端设备的不断增加,数据规模和复杂程度不断攀升,云计算的数据处理能力与决策能力受到了巨大的挑战。为了保证供需互动在多终端接入的电力物联网中能够有效

¹发挥作用,急需一种全新的数据处理方法来分担云计算的压力。

²边缘计算作为一种新兴计算范式,近年来已经被越来越多地应用到了电力系统的数据处理领域中。与云计算将数据集中到云平台进行统一处理的方式不同,边缘计算通过网络边缘具有一定计算能力的设备处理数据,实现了数据在数据源附近的就地处理,满足了一些计算任务的低时延需求,缓解了云计算平台的计算负担,从而提高了数据处理效率,也减少了数据在通信网络中的传输,提升了数据的安全性^[15-16]。

³供需互动的数据来源广泛,大多来自远离云计算平台的需求侧终端与分布式能源系统,并且所采集的数据应包含目标终端的多个特征,因此供需互动数据具有多源异构的特点。基于此特点,边缘计算非常适合被应用到供需互动领域,以解决其数据处理需求大与算力支撑不足之间的不平衡问题。在需求侧潜力评估与分布式能源出力预测的数据处理相关问题中,边缘计算可以辅助终端进行就地数据处理,对供需终端的状态进行智能感知,提供精准的预测数据。这种方法不仅可以减轻云平台的计算压力,也可以省去数据传输的时间,提升计算速度,从而进一步增强供需互动的灵活性。在信息安全领域,边缘计算可以通过部署在供需终端的计算设备形成信息防护屏障。相比远离数据源的云计算平台,边缘计算终端由于靠近数据源,因此在保护数据源信息安全、发现网络攻击威胁等方面具备更高的灵活性。此外,边缘计算也能通过其算力与自身特点在供需互动的关键事件决策与电网整体运行优化等方面发挥作用。

⁴针对边缘计算应用于电力系统供需互动这一热点研究方向,本文首先总结了电力系统中边缘计算的相关概念与现有技术,然后在此基础上,探讨了边缘计算在供需互动中的已有应用及其技术方案。最后,对供需互动中的边缘计算的进一步深化部署和未来潜力进行了展望。

1 电力系统边缘计算概况

1.1 电力系统边缘计算架构

⁵在电力系统中,边缘计算体系分为4层:云、管、边、端^[17-19]。“云”表示云服务层,即部署在电力系统中的云平台,包括云计算中心、云数据中心、资源池。云服务层管理全局信息,作为边缘计算的上层,具备计算能力强,存储空间大,控制范围广的优势,负责对边缘计算终端的资源进行调

配，并与边缘计算终端协同解决一些复杂数据处理问题。其中，云计算中心汇集了计算资源。“管”表示网络层，即电力系统信息网络的整体管理系统，负责提供“云-边”，“边-边”的数据通信。“边”表示边缘层，是边缘计算体系的核心。通常指位于信息网络边缘侧的边缘设备，包括智能电表、无人机等设备，它们充当着边缘计算终端、边缘网关、边缘服务器等角色，集成了一系列数据处理应用和通信功能，能够在本地提供数据的多种计算服务。

“端”表示终端层，包含各类电力系统能源供需终端，如光伏电站、楼宇、电动汽车等。终端设备层是产生数据的源头，处理数据能力有限，通常负责对数据的感知，上传及执行边缘设备层或云服务层下发的命令。电力系统的边缘计算架构如图1所示。

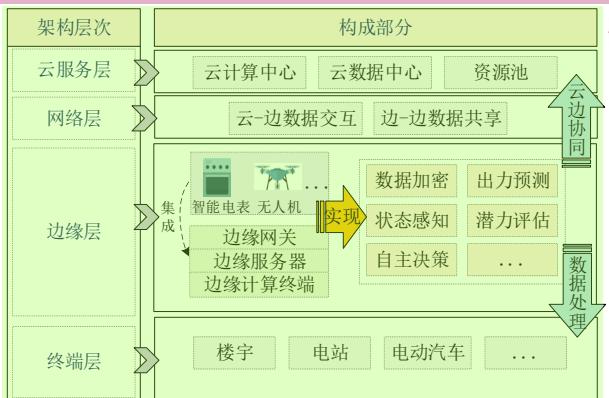


图1 电力系统边缘计算架构³

Fig. 1 Power system edge computing architecture⁴

1.2 云计算与边缘计算的发展概况⁵

在现代电力系统的数据计算模式中，云计算是⁶占据主导地位的计算模式^[20]。云计算通过物理的或虚拟的集中式资源池集中管理一定区域内的计算资源，用户可以通过电力系统的信息网络远程访问云计算资源平台^[21]。资源平台通过用户的数据处理需求调用资源池中的计算、存储等资源进行相应数据处理操作。在云计算模式中，数据采集终端以消费者的角色向云计算平台上传需求，请求服务；云计算平台以服务方的角色合理安排终端需求，调配资源进行数据的处理并返回终端需要的结果^[22]。在电力系统中，数据采集终端通常包括传感器、摄像头、电表等具备数据采集功能的设备。云计算的功能架构由4个部分组成，分别是云存储、云平台、云终端、云安全。4个部分协同合作，为用户提供高效的计算服务。而从服务提供的角度，云计算则可以分为公有云、私有云等^[23]。随着数据量的指数级上升和信息网络日益复杂化，云计算的拓展性不足，响应时延较长等缺点逐渐影响到了电网数据处理的效率。因此，边缘计算作为一种新兴技术被越

来越普遍地应用在了电力系统中。⁷

在边缘计算框架中，数据直接由数据源附近的边缘计算终端进行处理^[24]。边缘计算终端是边缘计算架构的重要构成部分，它位于网络的边缘侧，靠近数据源，聚合了信息采集与数据处理功能，具备一定的在本地对管理区域内的数据进行计算的能力^[25]。同时，边缘计算终端之间互相连成网络，形成数据共享的信息网络，具备边缘侧信息融合，协同优化的能力。边缘计算并不是云计算的替代或升级，而是作为云计算的延伸，通过自身灵活的特点弥补云计算的不足，可以与云计算共存于同一信息网络中，共同为网络中产生的数据提供计算服务^[26]。

1.3 电力系统边缘计算终端概况⁹

边缘计算终端是边缘计算中非常重要的组成部分。它是边缘算力的直接体现，也是数据源与其他信息节点进行信息交流的硬件基础^[27]。随着电力物联网的发展，电力系统边缘计算终端正在发生从功能单一到功能多样，从资源匮乏到资源丰富，从被动受控到自动智能的变革^[28-29]。对于电力系统的边缘计算终端，通常要求其具有数据采集、状态感知、数据传输与接收、数据计算等功能，其中具体的计算应用由数据源的数据特点与数据处理需求决定^[30]。本小节对电力系统中几种常见的边缘计算终端进行综述，并总结了它们的特点。

智能电表是电力物联网中的重要边缘计算终端。与普通电表相比，智能电表不仅能够进行传统的数据计量、数据显示等操作，同时具备信息集成，双向通信、分析优化等功能。近年来，智能电表在电力市场、需求响应、电网运行优化等电力系统相关领域有着愈来愈广泛的应用。申永鹏等人在智能电表中内置可结算虚拟货币的功能组件，并基于电力市场的相关理论，构建了可激励发电企业与用户响应系统需求的电力交易新模式^[31]；Quilumba等人通过智能电表对负荷的相关特征进行识别，从而对日内负荷预测的方法进行修正^[32]。

无人机是利用无线电遥控与内部程序控制的不载人飞机，可以在无人驾驶的情况下完成自动飞行和分配的各种任务，被认为是“空中机器人”。无人机活动灵活，受周围地形的影响较小，在面对极端环境时能够完成一些其他装置难以完成的任务^[33]。在电力系统中，无人机属于典型的电力系统边缘计算设备，通常用于对一定区域内的电力设备进行巡检，并对采集到的图片、环境参数等信息进行数据分析或通过无线传输的方式与云端进行信息交互。Vergura等人利用安装了图像处理设备的

无人机对光伏电站进行巡检,采集光伏电站的红外¹图像并进行图像识别与特征提取,从而在边缘对光伏电站设备进行缺陷检测^[34]。无人机也可以被用在边缘通信中断或通信受阻的情况下。刘瑞环等人利用无人机的灵活性与计算能力,在通信中断的极端情况下独立完成边缘的部分任务计算^[35]。

由于传统终端改造困难或算力不足等因素,许多用户选择使用独立的硬件设备作为边缘计算终端,而不是将计算功能集成到传统边缘设备中。目前,已可以做到通过片上系统(system on chip, SoC)将大量功能集成到一片芯片上,由单芯片独立作为边缘计算终端。SoC 即在一片集成了诸多电子器件与电子线路的芯片内实现存储、逻辑、处理、接口等多个模块,并通过模块进一步实现定时、计算等基本功能,再通过基本功能的组合交叉实现数据的处理^[36]。仲伟等人提出基于 SoC 和现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的前置数据设计,并在此基础上研究了边缘侧的任务并行处理框架^[37]。Joglekar 等人提出了一种基于 FPGA 的泰格能量算子(teager energy operator, TEO)算法,并通过硬件配置的方式来为边缘侧提供大量计算资源^[38]。Zeng 等人设计了一种名为边缘计算智能电源模块(edge computing intelligence power module, EC-IPM)的边缘智能硬件,部署这种硬件有助于促进电力物联网的建设进程^[39]。独立硬件有助于边缘应用的解耦与计算速度的提升,适用于边缘设备改造环境受限或对算力有较高需求的边缘计算场景。

此外,边缘计算终端还包括智能摄像头、智能采集器等,它们均具备高效、灵活、轻便的特点,是智能电网边缘计算体系的建设的重要环节。

2 电力系统供需互动的边缘计算关键技术⁴

本节将着重讨论电力系统供需互动中所涉及的边缘计算关键技术,包括:数据存储技术、智能决策技术、数据处理技术、数据安全技术。在电力系统供需互动的边缘侧领域下,这 4 项技术的相关研究逐上升,如图 2 所示,图中数据来源于 Web of Science 网站。

2.1 数据存储技术⁶

作为最靠近数据源的一环,边缘计算终端无时⁷不刻不接收到电力系统实时产生的海量的数据。如此庞大的数据对边缘计算的数据存储能力带来了挑战^[40]。合适的数据存储技术不仅能提升边缘计算的数据存储能力,也可以提高其计算能力。在边缘

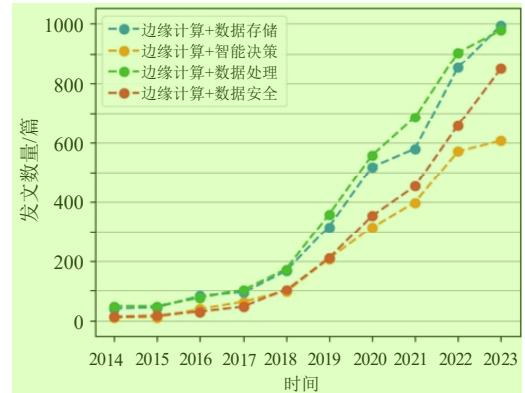


图 2 供需互动场景下相关关键技术文献发表趋势

Fig. 2 Publication trend of relevant key technical literature under the scenario of supply-demand interaction

计算环境中,一定区域内相邻的边缘存储设备通过¹⁰信息通路相连,构成边缘存储系统^[41]。边缘存储系统的数据存储能力受限于硬件设备,并不具备存储海量数据的能力,因此边缘计算对于不同类型数据采取了不同的技术手段。

边缘计算所产生的数据及采集到的待计算的数据一般通过 3 种技术存储:第一,对于用户方不需要实时访问,或对实时性要求低的数据,例如系统升级文件、已经被计算过的历史数据等,边缘计算终端通常选择云边协同存储技术进行存储^[42]。即

将这些数据全部上传至云端进行存储,同时在边缘侧保留最新几个版本的备份。此方法既节省了边缘存储系统的宝贵存储资源,又不会因数据读取过慢而造成损失。第二,对于待计算的数据及对实时性要求较高的已计算数据,边缘侧先通过模型压缩、模型轻量化等技术将数据规模缩小,然后将其存入边缘存储系统,实现了关键数据的边缘侧共享^[41]。相比云存储,边缘存储系统具有更好的实时性和便捷性。第三,对于一些数据处理实时需求极高的数据,边缘计算采取流计算技术,实现数据的边缘流处理,即产即存即算。流计算对大量数据流提供连续动态的分析,不需要对数据提前进行存储^[43]。

2.2 智能决策技术¹²

云计算平台是智能电网的控制中心。电力系统供需互动的各种策略的制定都由云平台完成,而决策信息也由云平台产生并下发至各个节点。在正常情况下,云端下发命令-边缘侧执行命令的决策体系能够最大化智能电网计算体系的作用^[44]。然而,电力系统信息网络并不是绝对坚固。极端环境、设备老化、软件故障、人为攻击等因素都会导致信息网络的阻塞或中断^[45]。此外,由于某些设备的地理位置比较偏僻,如沙漠光伏集群、海上风电集群。它们与云端的通信较为不便,接收云端指令需要相对

较长的时间。在信息传输中断或传输速度缓慢的情况下，决策指令难以及时传输至目标终端，从而导致供需互动过程中的信息不对等及动作不统一，进而造成经济损失甚至安全事故。在这类情况下，边缘计算系统不仅需要对相关数据进行独立处理，也需要具备一定程度上的自主决策能力，从而降低通信受阻期间的经济损失与安全风险。随着硬件系统的不断升级和软件技术的发展，如今的边缘决策系统已经可以通过边缘 AI 完成一定的决策工作，其决策技术主要分为两种。

边缘智能决策的第一种技术形式为分布式 AI²自主决策。分布式 AI 自主决策技术的核心在于为需要执行重要决策的边缘计算节点部署轻量级 AI 算法。通过 AI 算法的部署，边缘计算终端构成了多智能体系统，此系统通过 AI 算法对智能体获取的数据进行梳理与分析，实现对各个边缘设备的状态的动态感知，智能判别当前各节点环境特征，设备状态以及多智能体覆盖范围内的整体情况，并基于边缘计算终端内嵌的 AI 算法汇总信息，对当前情况与未来趋势做出判断，并下发相应决策。一种基于边缘分布式计算设计的车辆连接电网(vehicle to grid, V2G)方法被提出用于电动汽车参与电网调度的决策^[46]。Kulkarni 等人基于边缘计算设计了一种采用自主边缘控制设备的智能电网架构^[47]。

边缘智能决策的第二种技术形式为云-边协同决策。在边缘轻量级 AI 算法对一些复杂情况难以做出准确判断时，可通过边缘辅助处理的方式向云端传输局部信息，利用边缘的快速响应能力和云端的全局视角及资源优势共同做出决策。通常表现为云端提前依靠配置的 AI 构建整体决策策略并提前下发给各个边缘计算终端，在具体事件中，边缘计算终端则基于云端下发指令与边缘实际情况，进一步通过内嵌轻量级 AI 算法做出具体决策。Xing 等人提出了基于贝叶斯网络的云边协同安全决策框架：首先，云计算通过机器学习挖掘信息，制定策略，然后，边缘计算根据策略基于贝叶斯网络判断风险，并依据策略做出决策^[48]。蔡田田等人则提出了一种使用云边协同技术支撑的配电网快速供电恢复智能决策方案，其中边缘计算设备基于云端下发的整体策略，根据内嵌的智能算法与边缘侧实际情况构建负荷恢复策略^[49]。

2.3 数据处理技术⁴

在边缘计算中，数据处理方式分为批处理与流⁵处理两种。在批处理中，数据先被收集、落库，然后进行处理，而流处理则是把不断产生的数据视作

数据流，对其进行实时处理。⁶

批处理技术是边缘计算终端处理数据的主要⁷技术。边缘计算终端相比云端而言，计算资源匮乏，存储空间不足。然而，配置成熟的流处理框架需要较大的存储空间以及复杂的相关环境。以流处理框架 Spark Streaming 为例，安装此框架需要数百 MB 的空间，并且需要配置多个环境，如 Java 开发工具包(Java development kit, JDK)环境。现有边缘计算终端难以满足这些条件，因此在当下的边缘计算中，批处理技术依旧占据主导地位。

边缘计算中的流处理技术具有巨大的发展空间⁸。流处理可以实现数据的完全实时处理，可以在最大程度上降低响应时间，此外，流处理不需要将数据按批次落库，能够为边缘计算终端节省一定的存储空间。边缘计算部署的目的之一就是提高计算响应速率，从这个角度而言，流处理更加契合边缘计算的需求。由于软硬件技术的限制，边缘流处理技术并未被大规模地应用于电力物联网中，但已经成为边缘计算领域研究的热点。国家重点研发计划“物联网与智慧城市关键技术及示范”重点专项“物联网智能感知终端平台系统与应用验证”就强调了流处理技术在电力物联网终端的应用价值。党皓天等人对边缘计算的流处理技术进行了探索，通过边缘侧配置的 SoC FPGA 硬件对数据进行流处理，进而对配网的电压控制策略进行优化^[50]。Kim 等人基于边缘计算提出了一种图像的流处理方法，并认为其相比其他数据处理方式耗时耗能更少^[51]。Zhu 等人设计了一种适用于边缘计算终端的轻量级流处理框架，并验证了此框架在电力物联网边缘侧的节能高效性^[52]。

2.4 数据安全技术⁹

在供需终端处理数据时，需要重点关注信息的¹⁰隐私和安全。因为边缘计算终端所接收的数据包含大量发电机组、关键设备、用户的隐私、机密数据，这些数据的泄露会造成巨大的安全威胁^[53]。边缘计算终端并不具备云计算平台的信息防护能力，因此目前边缘计算终端是信息攻击的一个重点目标，这对边缘计算的信息保护能力带来了巨大挑战。为此，边缘计算在保护终端数据方面使用了多种技术。

技术一是数据加密技术。数据加密技术是保护¹¹数据安全最直接的方法^[54]。边缘计算终端通常使用数字签名、同态密码等数字加密方法，在边缘计算终端接收数据后立刻对其进行加密，并通过数据聚合通信技术来传输这些数据^[55-56]。此外，也有相关

研究提出了一些创新的数据加密方式。Liu 等人提出一种基于双门陷阱的边缘信息加密系统, 提高了数据的隐私性、机密性与完整性^[57]。

技术二是区块链技术。区块链是一种具有安全可信、防篡改特性的分布式技术。边缘计算作为分布式系统, 为区块链的成功部署提供了支持。利用区块链的共识机制、身份隔离算法、零知识证明等功能可以有效地保护供需终端所产生的数据。目前, 已有研究对边缘计算支持区块链技术保护数据隐私的方面做出了贡献。Gai 等人设计了一种智能电网区块链边缘模型, 通过隐蔽通道等技术对用户隐私数据进行了保护^[58]。一种基于边缘计算与区块链的 EBDA 数据聚合方案被提出用以抵御电力系统网络攻击^[59]。

技术三是供需终端攻击后动态控制技术。面对网络攻击, 除了对数据进行保护, 也需要考虑受攻击后的对应方法。动态控制技术首先对边缘侧网络事件进行识别, 当检测到网络攻击行为时, 边缘计算终端将下达相应安全响应控制指令, 并根据事件的发展修正响应策略, 从而减少网络攻击所造成的损失, 降低其危害^[60]。

3 边缘计算在电力系统供需互动中的应用⁴

边缘计算已经在电力系统中部分场景中得到了广泛的应用, 但在供需互动中的应用仍然处于起步阶段。本节将从发电、输电、变电、配电、用电 5 个方面阐述边缘计算在供需互动中的应用现状。

3.1 边缘计算在发电侧的应用⁶

发电侧是电力系统的重要组成部分。发电侧作为电力系统的供应端, 通过各种方式(如火力发电、水力发电、核能发电等)产生电力。这些电力通过输电线路输送到需求侧, 满足用户的电力需求。在供需互动中, 发电侧能够通过灵活调整发电出力, 从而应对突发负荷变化、设备故障等不确定性因素, 确保电力供应的稳定性; 此外, 发电侧的参与也有助于优化电力系统的经济性^[61]。通过合理调度发电机组, 降低燃料成本、减少发电损耗, 从而降低用户用电成本。

边缘计算技术在发电领域的应用主要集中在实时监控和自动调节。一方面, 边缘计算终端通过传感器和智能设备实时收集发电侧的数据, 包括发电机组的运行状态、负荷变化、电网频率等。这些数据被传送到边缘节点, 进行实时分析和处理。实时监控使运维人员能够迅速掌握发电侧的运行情况, 及时发现异常, 预测潜在故障, 从而采取相应

的措施, 确保电力系统的稳定性和安全性。另一方面, 边缘计算终端能够根据实时监测的数据, 自动调节发电机组的运行状态。发电侧自动调节提高了供需互动的灵活性和响应速度, 减少了人工干预的需求, 缓解了传统的集中式数据处理的压力, 提高了供需互动的效率。边缘计算辅助发电机组自动调节示意图如图 3 所示。郑中原等人研究了一种针对发电机组节能信息监测的云平台系统, 通过边缘采集终端对各发电机组信息进行采集与标准化, 再将预处理后的数据传输至云平台进行复杂分析, 从而完成一系列监测功能^[62]。孙文文等人则对边缘计算完成光伏发电机组自动控制进行了研究, 研究结果表明, 边缘计算设备能够根据内嵌的算法, 完成对光伏发电机组的一次调频和无功电压控制等功能^[63]。

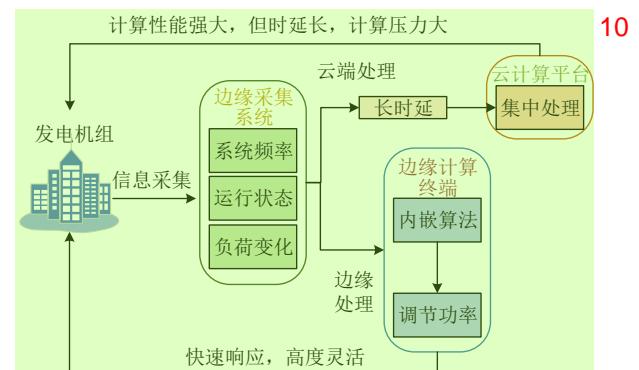


图 3 边缘计算辅助发电机组自动控制示意图¹⁰
Fig. 3 Illustration of edge computing assisted generator set automatic control¹¹

此外, 边缘计算已经被作为一种数据聚合与处理的手段使用在了分布式能源的出力预测中。作为分布式能源出力预测的主要手段, 云计算通常需要将数据传输到远程云服务器进行处理, 这会导致较大的计算时延, 而且将数据上传至云端存在一定的安全风险, 尤其是涉及敏感信息的情况。边缘计算能够就地完成出力的预测, 减少数据传输时延; 同时避免了将数据上传至云端的风险。这有利于保证分布式能源出力预测的实时性, 这有利于对整体供需互动的策略制定。Zhu 等人提出了一种部署于光伏集群的边缘计算设备上的卷积计算流处理框架, 这一框架能够有效提升边缘侧对光伏数据的计算速度, 为在边缘侧进行高效快速的出力预测提供了技术基础^[52]。欧阳含煜等人针对边缘服务资源的有限性, 基于差分自回归整合移动平均模型与门控循环单元提出了适用于边缘计算终端的风、光、荷组合预测方法^[64]。

3.2 边缘计算在输电侧的应用¹³

输电侧在电力系统的供需互动中扮演着关键¹⁴

角色,它连接了发电侧和配电侧,确保电力能够高效、稳定地传输,是实现电力系统供需互动的重要组成部分。

边缘计算技术在输电侧的应用集中在对输电线路的故障诊断。通过在输电线上部署智能终端、无人机等边缘计算设备,边缘计算平台可以实时监测电流、电压、温度等参数。一旦出现异常,边缘节点能够及时发出警报,通知运维人员进行检修。实时故障监测与快速响应相结合有助于减少停电时间,提高供需互动的可靠性和安全性。输电线路故障边缘检测框架如图4所示。张鋆等人针对资源受限的边缘设备,提出了一种基于贡献度感知通道剪枝策略,将模型进行轻量化压缩,能够有效地在本地运行异常目标检测模型,从而实现输电线路的异常目标高效边缘检测^[65]。马富齐等人则提出了一种轻量型输电线路覆冰厚度的终端判别方法,将轻量化的卷积神经网络MobileNetV3部署在资源受限的边缘计算终端中,实现了在极端天气下的输电线路边缘覆冰程度自检测,提升了供需互动的可靠性^[66]。

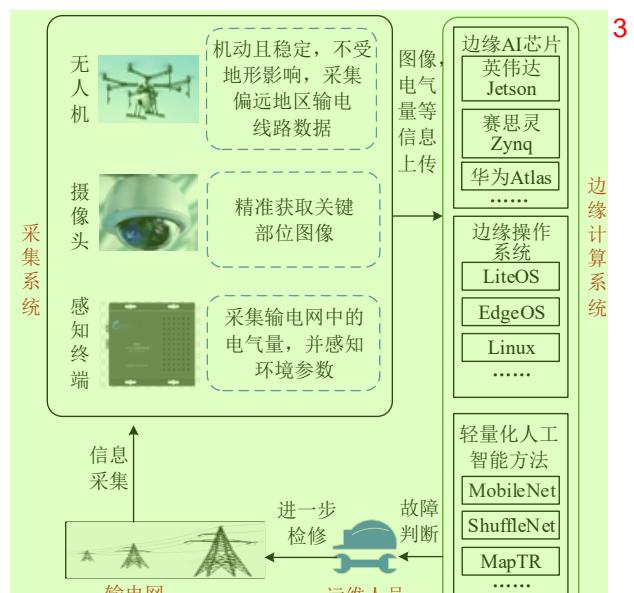


图4 输电线路故障边缘检测框架

Fig. 4 Framework of transmission line fault edge detection

此外,边缘计算还可应用于输电线路巡检,具体实现方式是通过部署了智能识别等功能的无人机、直升机等边缘计算设备对输电线路进行自动化巡检,维护输电线路的稳定输电进而保障供需互动策略的执行。

3.3 边缘计算在变电侧的应用

变电侧负责将高压输电线路传送来的电能进

行变压、变频,以适应不同电压等级的用电需求。⁸变电站的运行状态直接影响供需互动的稳定性。只有在电力系统中的电压、频率等参数都在一定范围内保持稳定的前提下,供需互动的相关策略才能执行下去。

变压器状态监测是目前边缘计算在变电侧应用的重要场景。边缘计算可以在变电站内部部署小型计算设备,将传感器数据在本地实时处理,减少数据传输延迟。边缘计算终端能够通过数据融合、动态推演等处理方法来分析数据,这有助于更快地检测到潜在问题,例如电流过载、电压异常等。边缘计算也可以分析历史数据并应用机器学习算法,预测设备故障的可能性。这有助于制定更有效的维护计划,减少停机时间,并提高设备的可靠性。变压器状态边缘监测流程如图5所示。刘志坚等人通过平均池化层代替全连接层的思路设计了一种简化压缩视觉组合网络,此方法能够将模型部署于资源受限的边缘计算终端,实现了变压器故障的边缘自主识别,提升了变压器故障监测的效率^[67]。邹阳等人则考虑了云边协同的技术,通过边缘计算设备采集变压器关键数据并提取其特征,而后传输至云平台进行进一步的绝缘状态评估^[68]。

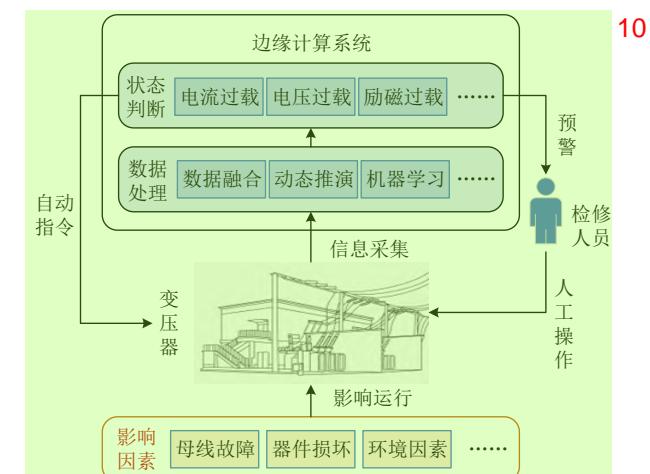


图5 变压器状态边缘监测示意图

Fig. 5 Illustration of transformer status edge monitoring

3.4 边缘计算在配电侧的应用

配电侧在电力供需互动中扮演着桥梁和调度者的角色。它不仅可以调度分布式能源,如光伏、风电和储能系统,以满足不同时间段的用电需求,通过灵活资源的精准调控,优化电网运行;也可以监测终端用户的用电情况,实时调整负荷,以适应电网的变化。

边缘计算在构建配电网虚拟电厂的过程中发挥了重要作用。虚拟电厂是一种通过先进信息通信

技术和软件系统, 将分布式电源、储能系统、可控负荷等分布式资源聚合起来, 形成一个如同发电站一样参与电网运行和市场交易的智慧能源系统^[69]。边缘计算技术在虚拟电厂实施过程中的优势主要体现在3个方面: 第一, 边缘计算将计算能力部署在离终端设备更近的位置, 可以满足虚拟电厂对实时性的需求。第二, 虚拟电厂涉及许多敏感数据, 如用户数据、用电量、预测负荷等, 边缘计算可以在本地处理数据, 提升数据的安全性。第三, 边缘计算还可以根据需求灵活部署计算资源, 适应虚拟电厂不断变化的业务规模和需求。因此, 边缘计算可以很好地与计算、存储能力强大的云计算相结合, 以云-边协同的形式构建虚拟电厂。云-边协同虚拟电厂构建框架如图6所示。李彬等人将边缘计算终端视为虚拟电厂中靠近能源终端和数据源头的分布式智能代理, 通过自身的计算资源实现虚拟电厂的全场景覆盖与业务数据精细化^[70]。王宣元等人则提出在电网边缘侧配置即插即用的边缘智能网关, 实现虚拟电厂可调节资源可通过物联网标准协议接入平台^[71]。

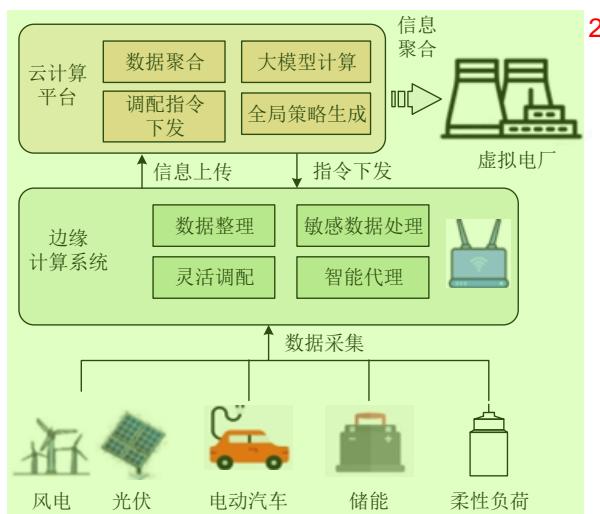


图6 云-边协同虚拟电厂构建框架 3

Fig. 6 Cloud-edge collaborative virtual power plant 9 construction framework

此外, 边缘计算还可以应用于配电物联网的构建等信息物理交互场景, 在这些场景中, 边缘计算设备作为信息侧最靠近物理侧的智能计算设备, 能够实现数据采集、分析、梳理等一系列功能, 有效提升了配电网的边缘智能化与信息化。

3.5 边缘计算在用电侧的应用 5

用电侧作为电力系统的需求端, 在供需互动中扮演着重要的角色。用电侧可以通过灵活调整用电负荷来响应电力系统的需求, 也可以采用智能用电技术, 优化用电计划, 减少峰谷差, 提高用电效率,

还可以成为虚拟电厂的一部分, 将分布式发电、储能和其他可控负荷聚合起来, 这有助于实现源荷互动。总之, 用电侧在供需互动中的积极参与, 有助于保障电力系统的安全运行、促进清洁能源消纳, 并推动电力能源行业的数字化转型。

边缘计算技术能够为用户带来许多便利, 为用户参与供需互动提供条件。本节将主要讨论边缘计算在保护用户数据隐私与需求响应中发挥的作用。随着互联网和大数据时代的到来, 数据的价值越来越显著, 在电力领域中, 用户数据发挥着重要作用。在供需互动中, 云计算平台采集和存储了大量电力客户数据, 这些数据包含用户的身身份信息、用电情况等隐私内容。这使得电力用户的数据隐私安全问题成为一个迫切的问题。边缘计算能够很好地解决这一难题。通过边缘计算技术, 能够将用户的隐私数据在用户侧进行就地加密与融合, 再将经过融合的不包含隐私信息的数据上传给云端进行计算, 对于一些非常敏感而不适合上传的数据, 也可以通过边缘计算终端的计算功能进行本地处理。用户数据边缘保护框架如图7所示。刘汝鸿等人提出了一种将区块链工作量证明共识算法卸载至边缘计算设备上进行的策略, 能够有效提升电力物联网用户数据处理的效率, 降低能耗成本, 同时可以保证其安全性^[72]。吴志伟等人则提出了一种基于区块链的可验证策略加密方案和基于边缘计算的安全撤销密文密钥方案, 能够对智能电网中电力用户的数据安全进行有效的安全加密^[54]。

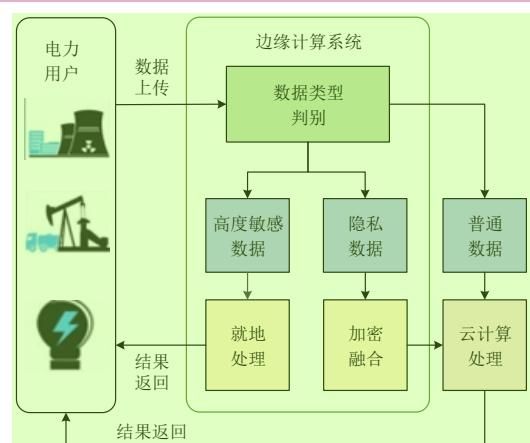


图7 用户数据边缘保护框架 11

Fig. 7 User data edge protection framework 12

此外, 边缘计算还能应用于用户侧负荷预测、可调控负荷规划、电动车需求响应等场景, 在这些场景中, 边缘计算能够将用户的数据处理任务卸载到边缘侧进行, 满足部分任务低时延、高隐私性的要求, 从而促进供需互动策略在用户侧更顺利地实施。

4 边缘计算在供需互动领域中的应用展望¹

作为一个正处于不断发展中领域的边缘计算，已经体现了其计算优势与显著作用。在电力系统中，边缘计算已经通过多种技术参与到供需互动环节中，有效地提升了供需互动的灵活性、安全性、稳定性、准确性。但是边缘计算与供需互动的交叉研究并不成熟，还存在巨大的应用潜力值得挖掘。随着计算机技术的成熟，人工智能方法已被越来越广泛地应用于供需互动中。智能策略的实施需要电力物联网云边协同联动：云端依托强大的计算能力与存储能力进行策略模型的训练与迭代；边缘侧则发挥距数据源近的优势，执行策略中需要边缘参与分布式计算的部分，在边缘侧进行数据预处理，隐私数据加密等就地计算操作。此外，区块链对数据隐私的保护与系统高度可用性可以被应用在电力市场交易与信息安全防护等领域。在区块链的设计与运行中，云边架构也发挥着重要的作用：云端通过充足的硬件设备提供区块链所需的复杂的计算与存储服务，并构建多副本备份，提升区块链安全性；边缘侧的终端设备则收集环境中的数据，通过自身的计算能力与加密技术，构建对应于物理实体的区块，从而实现电力系统区块链的构建。近十年来，关于这两个领域的研究工作稳步上升，图8展示了在电力系统供需互动的领域下，边缘人工智能技术和边缘计算-区块链结合技术的相关文献发表情况，图中数据来源于Web of science网站。这说明此两项技术有助于提升供需互动的多方面性能，具有深入研究的价值，本节将针对电力系统供需互动中这两项技术未来的发展方向进行展望，提出作者的看法。

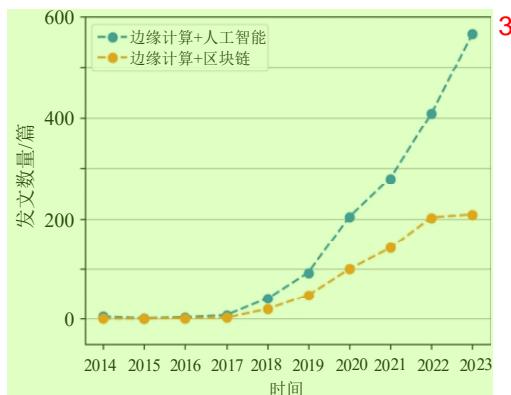


图8 供需互动场景下相关领域发表文章趋势³

Fig. 8 Trends of papers published in relevant fields under the scenario of supply- demand interaction⁴

4.1 人工智能方法在边缘计算终端的接入⁵

人工智能的接入一直是边缘计算领域热门的⁶

研究课题。人工智能早期只能进行一些简单的学习与数据计算，且需要部署在专用设备中。随着科学技术的发展，如今人工智能技术已经可以在大多数设备中发挥作用。目前，许多关于边缘计算中人工智能技术的运用的研究正在展开，如对分布式能源出力的智能预测，对需求侧环境事件的智能感知与识别等。但基于电网边缘的人工智能应用研究仍处于起步阶段，其中存在许多方向值得深入挖掘。本节将提出作者认为人工智能在未来能够辅助边缘计算在供需互动中发挥作用的3个方向及潜在的研究思路。

1) 辅助构建电网数字孪生体。数字孪生技术⁸为供需互动的动态过程观察与控制提供了新的解决思路。数字孪生通过量测设备在线感知电力系统物理实体的实时状态，结合对其物理特性的认知，通过电气、通信、计算机、地理等多学科的集成分析，对电网进行多维度、多概率、多时空的立体仿真。由于边缘计算的计算能力限制，针对电网数字孪生的数据分析目前仍由计算能力强大的云计算平台承担。由于通信时延的限制，对于电网的数字孪生仍无法做到完全准确，存在一定的滞后性。作者认为，边缘计算具备进行数字孪生的基础，可以有效地参与进电网数字孪生体的构建中。第一，靠近物理实体是边缘计算的独有优势，其数据获取的低时延可以满足对边缘实体数字孪生的时效性与准确性。边缘计算的独有的位置优势使得它在将来势必成为电网数字孪生体构建的重要计算单元，而主要制约其发展的是其计算能力。目前，作者已在提升边缘计算终端算力的领域进行了有关研究，在边缘计算终端开发了针对光伏集群出力预测的流处理功能组件，这一成果能够使得边缘计算终端以流处理的形式处理卷积神经网络中卷计算的速度，从而提升算力^[52]。第二，人工智能的接入，则为边缘计算终端实现独立个体的数字孪生提供了技术支持。作者认为，人工智能与边缘计算的结合，能够有效提升边缘计算终端对数据特征的提取能力，从而能够更精准地刻画数字孪生体。对边缘实体的数字孪生包括两个部分：其一是对其外观进行虚拟实体的刻画。对于这一目标，Nanodet，YOLO(you only look once)，CenterNet等检测网络具备资源消耗量少，目标识别速度快的特点，可以被用于边缘侧实体外观刻画的过程。其二是对边缘实体状态进行刻画。对于这一目标，轻量级深度学习框架作为一种能够感知数据异常情况且可以被部署于边缘计算终端上的方法适合于被使用。边缘侧产生的大

量数据可以被用于深度学习的训练,从而构建能够在任何环境和条件下快速生成数字孪生体的边缘智能体。目前 MobileNet, ShuffleNet 等轻量级深度学习网络就已经被尝试用于部署在电力系统边缘计算终端上。综上,作者认为,提升算力是边缘计算参与电网数字孪生体构建的技术基础,在此基础上,可以考虑通过部署机器视觉、深度学习等人工智能框架来实现对边缘实体的外观和状态数字孪生体的刻画。

2) 进行边缘自主决策。上文已提到边缘决策技术的相关内容,但这方面的研究仍处于起步阶段。在本节,作者将针对决策前的数据处理与作出决策本身两个方面提出几个可行的研究点。第一,在边缘侧进行自主决策前,需要对物理实体数据进行全面方位的梳理与分析,以感知物理实体的状态并做出决策,而人工智能技术在梳理、分析数据方面具备独有的优势。以输电线路为例,边缘计算在自主决策时需要对一些具备强时效性的电气特征数据,如电弧形貌、线路温度等进行快速处理。人工智能方法可以促使边缘计算终端实现对这些数据进行挖掘拓展的能力,如在线深度学习能够通过动态的数据,对系统的未来的发展趋势进行判断;而 Prophet 预测模型则支持多影响因素的自定义,能够有效提升状态感知的灵活性,因此以上方法与边缘计算的结合存在可研究空间。第二,传统的简单决策模型具有灵活性差、可扩展性低等劣势,而决策智能技术能够为边缘计算提供相应的决策服务。决策智能包括群体智能建模,考虑多影响因素的自我决策等技术,内部实现方法包括机器学习、智能博弈等,能够在各种环境下做出合适的决策。由于边缘环境的不确定性,考虑多因素的模糊决策方法适用于边缘计算的自主决策。目前相关技术包括基于大数据智能处理的分布式模糊决策树、基于神经网络的模糊推理系统等。上述方法目前尚较少应用于电力系统的边缘决策中,主要原因还是边缘计算终端匮乏的计算资源。但随着边缘计算终端的硬件技术不断提升和 SoC 的发展,这些方法值得更深入的研究。

3) 实现边缘自趋优。自趋优是指物理主体通过不断调整自身参数,从而向更优的运行态过渡,在供需互动中,自趋优能够最大化各方利益,保证各参与供需互动设备的稳定运行,提升供需互动的经济性和稳定性。在电力系统设备及设备群的自趋优过程中,优化的方向瞬息万变,优化的机会转瞬即逝,因此边缘计算低时延、高响应速度的优势使

得它很适合被应用于自趋优中。强化学习是一种通过智能体与环境的不断交互与评价,寻求最优策略的人工智能方法。因此将强化学习方法作为边缘物理主体与环境进行信息交流与调整状态的工具,能够使得其在任何环境下快速地找到最优状态。作者认为,将强化学习与边缘计算结合起来是提升边缘自趋优效果的一大发展方向。考虑到边缘计算相对匮乏的计算资源,作者认为研究通过可部署于边缘计算终端上的轻量级强化学习框架(MnasNet, PARL(paddle reinforcement learning)等)来实现边缘自趋优是一个值得深入研究的方向。

4.2 边缘计算与区块链的结合

区块链的核心是安全的分布式系统。此系统具备高完整性与可用性两个特点。高完整性即系统中数据不可篡改、高可用性即系统在遭到网络攻击的情况下,系统中的服务依旧高度可用。区块链可以实现信息安全、成本节约、效率提升等效果,非常适合应用于基于边缘计算的供需互动中。边缘计算结合区块链的领域存在广阔的研究前景,本节将提出作者认为区块链在未来如何与边缘计算结合从而在供需互动中发挥作用的两个方向。

1) 基于边缘计算构建电力系统碳排放权交易区块链。电能的产生伴随着二氧化碳的产生,为了有效管控二氧化碳的排放,稳定电力市场的交易,构建稳定的市场体系,碳排放权交易被引入电力市场中。作为新兴的概念,碳排放权交易市场的建设还处于摸索中。2024年2月4日公布的《碳排放权交易管理条例》将于2024年5月1日起施行。这意味着我国的碳排放权交易开始进入起步阶段,而其交易体系存在着许多值得研究的内容。作者认为,基于区块链构建的碳排放权交易体系可以有效提高其交易效率与公平性,边缘计算可作为区块链的落地载体参与到碳排放权交易市场的建设中。然而,如何通过边缘计算构建碳排放权交易市场尚未被深入研究,本节提出两个值得关注的研究点。第一,通过边缘计算系统构建区块链交易平台的方法。边缘计算为区块链提供了一种低时延、高计算性能、分布式的计算设备。在区块链的构建中,可以将边缘计算终端视为碳排放权交易区块链的载体,通过共识算法对边缘关键数据进行审计,并生成区块,上链运行;区块之间的信息交互可以通过边缘计算通信系统实现;区块的数据存储则可以通过边缘计算存储系统实现。第二,边缘计算参与碳排放权交易区块链构建的技术需求。碳排放权交易较于电力交易存在其不同之处。碳排放权相较于电

力是一种虚拟的商品，不具备电力的物理实际特性。因此，这要求边缘计算终端具备对于碳交易权的界定与判断能力，且各边缘计算终端的判断标准需完全统一，才能确保市场的稳定运行。从这个角度出发，可以考虑边缘计算终端对碳排放权的相关指标自主判定能力的研究。

2) 基于边缘计算构建虚拟电厂互动框架。上文已经提到了边缘计算在虚拟电厂构建中的应用现状，本节将进一步提出考虑边缘计算与区块链结合时，关于虚拟电厂构建的一些思考。第一，可以通过区块链的共识机制将分散的资源节点，如分布式能源、储能、可调负荷与虚拟电厂控制中心组合成区块链网络，实现点对点交易，从而解决传统控制模式下虚拟电厂控制中心可靠性低、资源利用率低等问题。共识机制的关键在于各资源节点应具备一定的数据计算能力与存储能力来支持算法的分布式部署。在这一过程中，云端负责设计共识算法与部署方案，边缘计算终端则负责执行所部署的具体算法，并将相关交易信息进行存储与共享，从而达到虚拟电厂“自治”与“共享”的目标。第二，区块链能够通过独有的分布式存储技术提升虚拟电厂数据的真实性与安全性。首先，可以考虑对边缘计算终端处理分布式节点敏感数据的算法研究。虚拟电厂的数据在交互与聚合过程中存在风险，通过研究敏感数据的加密与融合算法，可以有效地规避数据在传输过程中可能遭遇的风险。其次，可以考虑以边缘计算终端为单位构建新区块，并将边缘计算的分布式存储技术引入区块链中，实现数据的分布式存储，以提升数据存储的效率与安全性。

5 结语

本文首先综合阐述了边缘计算在电力系统中的发展概况，包括其在电力系统中的整体架构，主要使用的设备情况和各设备所具备的功能。随后进一步综述了边缘计算在电力系统供需互动中的关键技术，包括数据存储技术、边缘决策技术、数据处理技术、数据安全技术。接着，从发电、输电、变电、配电、用电5个方面阐述边缘计算在供需互动中的应用现状。最后，本文对边缘计算在供需互动领域中的应用前景进行了展望，从人工智能进一步接入边缘计算终端与区块链技术结合边缘计算两个角度进行了阐述。边缘计算作为新兴的计算技术还在蓬勃发展之中，而供需互动的场景也随着科技的进步而不断变化，边缘计算应用于供需互动的相关研究仍处于起步阶段，在未来存在着广阔的发展空间。

展前景与应用价值。⁵

参考文献

- [1] 徐铮, 孙宏斌, 郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7194-7205.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205(in Chinese).
- [2] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028(in Chinese).
- [3] 葛磊蛟, 李京京, 李昌禄, 等. 面向零碳园区的综合能源系统优化运行技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1821-1835.
GE Leijiao, LI Jingjing, LI Changlu, et al. Overview of integrated energy system optimal operation technology for zero-carbon parks[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1821-1835(in Chinese).
- [4] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 193-207.
QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207(in Chinese).
- [5] 张晓华, 刘道伟, 李柏青, 等. 智能电力物联网功能架构体系设计及创新模式探讨[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1633-1640.
ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. Discussion on the functional architecture system design and innovation mode of intelligent power internet of things[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1633-1640(in Chinese).
- [6] 陈典, 陆润钊, 张松涛, 等. 新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 3952-3970.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970(in Chinese).
- [7] 孔祥玉, 刘超, 陈宋宋, 等. 考虑动态过程的可调资源集群多时间节点响应潜力评估方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 55-64.
KONG Xiangyu, LIU Chao, CHEN Songsong, et al. Assessment method for multi-time-node response potential of adjustable resource cluster considering dynamic process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 55-64(in Chinese).
- [8] 孔祥玉, 刘超, 王成山, 等. 基于深度子领域自适应的需求响应潜力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5786-5797.
KONG Xiangyu, LIU Chao, WANG Chengshan, et al. Demand response potential assessment method based on deep subdomain adaptation network[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5786-5797(in Chinese).
- [9] 李亚平, 姚建国, 雍太有, 等. 居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5519-5528.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528(in Chinese).
- [10] 廖若愚, 刘友波, 沈晓东, 等. 基于双向循环插补网络的分布式光伏集群时序数据耦合增强方法[J/OL]. 电网技术, 2023: 1-17 [2024-02-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1681>.
LIAO Ruoyu, LIU Youbo, SHENG Xiaodong, et al. Time series data coupling enhancement method of distributed photovoltaic cluster

- 1 2
- based on bidirectional recurrent imputation network[J/OL]. Power System Technology, 2023, 1-17[2024-02-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1681>(in Chinese).
- [11] 武宇翔, 韩肖青, 牛哲文, 等. 融合多注意力深度神经网络的可解释光伏功率区间预测[J/OL]. 电网技术, 2023, 1-19[2024-02-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0978>.
- WU Yuxiang, HAN Xiangqing, NIU Zhewen, et al. Interpretable photovoltaic power interval prediction using multi-attention deep neural networks[J/OL]. Power System Technology, 2023, 1-19[2024-02-09]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0978>(in Chinese).
- [12] YONA A, SENJYU T, FUNABASHI T, et al. Determination method of insulation prediction with fuzzy and applying neural network for long-term ahead PV power output correction[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 527-533.
- [13] 陈刘东, 刘念. 面向互动需求响应的虚假数据注入攻击及其检测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 15-23.
- CHEN Liudong, LIU Nian. False data injection attack and its detection method for interactive demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 15-23(in Chinese).
- [14] LI Junlong, GU Chenghong, XIANG Yue, et al. Edge-cloud computing systems for smart grid: state-of-the-art, architecture, and applications[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(4): 805-817.
- [15] LI Xiaoxia, LI Wei, YANG Qiang, et al. Edge-computing-enabled unmanned module defect detection and diagnosis system for large-scale photovoltaic plants[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9651-9663.
- [16] LV Lingling, WU Zongyu, ZHANG Lei, et al. An edge-AI based forecasting approach for improving smart microgrid efficiency[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11): 7946-7954.
- [17] 孙浩洋, 张冀川, 王鹏, 等. 面向配电物联网的边缘计算技术[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4314-4321.
- SUN Haoyang, ZHANG Jichuan, WANG Peng, et al. Edge computation technology based on distribution internet of things[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4314-4321(in Chinese).
- [18] ZHOU Hua, ZHANG Zhenyu, LI Dawei, et al. Joint optimization of computing offloading and service caching in edge computing-based smart grid[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(2): 1122-1132.
- [19] 岑伯维, 蔡泽祥, 武志刚, 等. 电力物联网边缘计算终端的微服务建模与计算资源配置方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 78-86.
- CEN Bowei, CAI Zexiang, WU Zhigang, et al. Microservice modeling and computing resource configuration method for edge computing terminal in electric internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 78-86(in Chinese).
- [20] BAEK J, VU Q H, LIU J K, et al. A secure cloud computing based framework for big data information management of smart grid[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015, 3(2): 233-244.
- [21] ISLAM M T, KARUNASEKERA S, BUYYA R. Performance and cost-efficient spark job scheduling based on deep reinforcement learning in cloud computing environments[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2022, 33(7): 1695-1710.
- [22] ASIM M, WANG Yong, WANG Kezhi, et al. A review on computational intelligence techniques in cloud and edge computing[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2020, 4(6): 742-763.
- [23] YANG Dong, WEI Hua, ZHU Yun, et al. Virtual private cloud based power-dispatching automation system — architecture and application[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1756-1766.
- [24] 周振宇, 王墨, 廖海君, 等. 电力物联网 5G 云-边-端协同框架与资源调度方法[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1641-1651.
- ZHOU Zhenyu, WANG Zhao, LIAO Haijun, et al. 5G cloud-edge-end collaboration framework and resource scheduling method in power internet of things[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1641-1651(in Chinese).
- [25] GU Lin, ZHANG Weiying, WANG Zhongkui, et al. Service management and energy scheduling toward low-carbon edge computing[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2023, 8(1): 109-119.
- [26] SHIRAZI S N, GOUGLIDIS A, FARSHAD A, et al. The extended cloud: review and analysis of mobile edge computing and fog from a security and resilience perspective[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(11): 2586-2595.
- [27] 盛戈皞, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1765-1778.
- SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778(in Chinese).
- [28] SUN Qie, LI Hailong, MA Zhanyu, et al. A comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(4): 464-479.
- [29] XU Aidong, JIANG Yixin, WU Jinsong, et al. Efficiency and security for edge computing assisted smart grids[C]//Proceedings of 2019 IEEE Globecom Workshops. Waikoloa: IEEE, 2019: 1-5.
- [30] ORLANDO M, ESTEBSARI A, PONS E, et al. A smart meter infrastructure for smart grid IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(14): 12529-12541.
- [31] 申永鹏, 孙嵩楠, 赫婷, 等. 基于数字人民币的智能电表及实时电力交易新模式[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 178-187.
- SHEN Yongpeng, SUN Songnan, HE Ting, et al. Real-time power trading mode based on an e-CNY smart electricity meter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 178-187(in Chinese).
- [32] QUILUMBA F L, LEE W J, HUANG Heng, et al. Using smart meter data to improve the accuracy of intraday load forecasting considering customer behavior similarities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 911-918.
- [33] LIU Yi, XIE Shengli, ZHANG Yan. Cooperative offloading and resource management for UAV-enabled mobile edge computing in power IoT system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12229-12239.
- [34] VERGURA S. Correct settings of a joint unmanned aerial vehicle and infrared camera system for the detection of faulty photovoltaic modules[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2021, 11(1): 124-130.
- [35] 刘瑞环, 陈晨, 叶志刚, 等. 基于无人机应急通信的配电网灾后信息物理协同恢复策略[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1218-1229.
- LIU Ruihuan, CHEN Chen, YE Zhigang, et al. Cooperative cyber-physical distribution system restoration with UAV-based emergency communication UAV after disasters[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1218-1229(in Chinese).
- [36] MOREIRA N, LÁZARO J, BIDARTE U, et al. On the utilization of system-on-chip platforms to achieve nanosecond synchronization accuracies in substation automation systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1932-1942.
- [37] 仲伟, 王仲, 陶保震, 等. 新一代自主可控保护装置软硬件平台技术[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 135-140.
- ZHONG Wei, WANG Zhong, TAO Baozhen, et al. Software and

- hardware platform technology of an independent controllable relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 135-140(in Chinese).
- [38] JOGLEKAR A, GURRALA G, KUMAR P, et al. Open-source heterogeneous constrained edge-computing platform for smart grid measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9003612.
- [39] ZENG Xiao, LI Zehong, WAN Jiali, et al. Prototype of edge computing IPM with hardware artificial neural network soft sensor and controller for parallel connected IGBT current distribution[C]// Proceedings of 2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Vienna: IEEE, 2020: 392-395.
- [40] BABAR M, JAN M A, HE Xiangjian, et al. An optimized IoT-enabled big data analytics architecture for edge - cloud computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(5): 3995-4005.
- [41] JIN Hai, LUO Ruikun, HE Qiang, et al. Cost-effective data placement in edge storage systems with erasure code[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2023, 16(2): 1039-1050.
- [42] HE Debiao, KUMAR N, ZEADALLY S, et al. Certificateless provable data possession scheme for cloud-based smart grid data management systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3): 1232-1241.
- [43] TANG Yuzhe, GEDIK B. Autopipelining for data stream processing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(12): 2344-2354.
- [44] BACHOURIS A, ANDRIOPoulos N, PLAKAS K, et al. Cloud-edge interoperability for demand response-enabled fast frequency response service provision[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2022, 10(1): 123-133.
- [45] LIU Ren, VELLAITHURAI C, BISWAS S, et al. Analyzing the cyber-physical impact of cyber events on the power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2444-2453.
- [46] SHANG Yitong, SHANG Yimeng, YU Hang, et al. Achieving efficient and adaptable dispatching for vehicle-to-grid using distributed edge computing and attention-based LSTM[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(10): 6915-6926.
- [47] KULKARNI S, GU Qinchen, MYERS E, et al. Enabling a decentralized smart grid using autonomous edge control devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7406-7419.
- [48] XING Hang, ZHOU Chunjie, YE Xinhao, et al. An edge-cloud synergy integrated security decision-making method for industrial cyber-physical systems[C]//Proceedings of the IEEE 9th Data Driven Control and Learning Systems Conference. Liuzhou, China: IEEE, 2020: 989-995.
- [49] 蔡田田, 姚浩, 杨英杰, 等. 基于云-边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 94-103.
CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 94-103(in Chinese).
- [50] 党皓天, 刘东, 陈飞, 等. 基于 SoC FPGA 硬件并行化计算的配电网电压控制技术[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 39-47, 91.
DANG Haotian, LIU Dong, CHEN Fei, et al. Voltage control strategy for distribution network based on SoC FPGA hardware parallel computing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 39-47, 91(in Chinese).
- [51] KIM H, PARK J, YANG S, et al. Edge-cloud cooperative image processing by partially streaming ROI data for metaverse applications[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia. Yeosu, Korea: IEEE, 2022: 1-3.
- [52] ZHU Bin, LIU Dong, LIU Tianyuan, et al. Lightweight stream processing framework based on distributed power terminals[C]// Proceedings of 2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Shanghai, China: IEEE, 2023: 758-763.
- [53] GUAN Zhitao, LI Jing, WU Longfei, et al. Achieving efficient and secure data acquisition for cloud-supported internet of things in smart grid[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 1934-1944.
- [54] 吴志伟. 智能电网中基于边缘计算的隐私保护与数据共享方案[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- [55] 康宇昊. 边缘计算环境中面向隐私保护的智能电网数据聚合方案 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [56] ZHAO Shui, LI Fenghua, LI Hongwei, et al. Smart and practical privacy-preserving data aggregation for fog-based smart grids[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2021, 16: 521-536.
- [57] LIU Jianan, WENG Jian, YANG Anjia, et al. Enabling efficient and privacy-preserving aggregation communication and function query for fog computing-based smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 247-257.
- [58] GAI Keke, WU Yulu, ZHU Liehuang, et al. Permissioned blockchain and edge computing empowered privacy-preserving smart grid networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7992-8004.
- [59] LU Weifeng, REN Zhihao, XU Jia, et al. Edge blockchain assisted lightweight privacy-preserving data aggregation for smart grid[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(2): 1246-1259.
- [60] 严康, 陆艺丹, 于宗超, 等. 配电网用户侧异构电力物联设备运行安全管控分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 53-61.
YAN Kang, LU Yidan, YU Zongchao, et al. Analysis on operation security management and control for user-side heterogeneous power internet-of-things devices in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 53-61(in Chinese).
- [61] 全杰, 齐子豪, 蒲天骄, 等. 电力物联网边缘智能: 概念、架构、技术及应用[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-22[2024-02-09].
<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231196>.
TONG Jie, QI Zihao, PU Tianjiao, et al. Edge intelligence to power internet of things : concept , architecture , technology and application[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-22[2024-02-09].
<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231196>(in Chinese).
- [62] 郑中原, 赵鹏, 姜玲, 等. 基于云平台的发电机组节能减排实时监控系统[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 148-154.
ZHENG Zhongyuan, ZHAO Peng, JIANG Ling, et al. A real-time monitoring and control system for energy saving and emission reduction of generator set based on cloud platform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 148-154(in Chinese).
- [63] 孙文文, 何国庆, 刘纯, 等. 物联网背景下应用于光伏发电的边缘计算设备关键技术研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 38-43.
SUN Wenwen, HE Guoqing, LIU Chun, et al. Research and application of key technologies for edge computing equipment used in photovoltaic power generation under background of IoT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 38-43(in Chinese).
- [64] 欧阳含熠, 张立梅, 白牧可. 基于门控循环神经网络的边缘服务中心风光荷组合预测方法[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 65-71.
OUYANG Hanyi, ZHANG Limei, BAI Muko. Combined prediction method for wind-photovoltaic-load in edge service center based on ARIMA-GRU[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 65-71(in Chinese).
- [65] 张鋆, 王继业, 宋睿, 等. 基于边缘智能的输电线路异常目标高

- 效检测方法研究[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1652-1661.
ZHANG Jun, WANG Jiye, SONG Rui, et al. Research on efficient detection technology of transmission line abnormal target based on edge intelligence[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1652-1661(in Chinese).
- [66] 马富齐, 王波, 董旭柱, 等. 面向输电线路覆冰厚度辨识的多感受野视觉边缘智能识别方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2161-2169.
MA Fuqi, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Receptive field vision edge intelligent recognition for ice thickness identification of transmission line[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2161-2169(in Chinese).
- [67] 刘志坚, 何蔚, 刘航, 等. 基于格拉姆角场变换和深度压缩模型的变压器故障识别方法[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1478-1489.
LIU Zhijian, HE Wei, LIU Hang, et al. Fault identification method for power transformer based on Gramian angular field transformation and deep compression model[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1478-1489(in Chinese).
- [68] 邹阳, 林锦茄, 李安娜, 等. 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.
ZOU Yang, LIN Jinjia, LI Anna, et al. Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43(in Chinese).
- [69] 王志维, 王秀丽, 雍维桢, 等. 含备用储能的5G基站虚拟电厂参与电力市场的交易策略研究[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 968-978.
WANG Zhiwei, WANG Xiuli, YONG Weizhen, et al. Research on the trading strategy of 5G base station virtual power plant with reserve energy storage in the electricity market[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 968-978(in Chinese).
- [70] 李彬, 郝一浩, 祁兵, 等. 支撑虚拟电厂互动的信息通信关键技术研究展望[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1761-1770.

1

LI Bin, HAO Yihao, QI Bing, et al. Key information communication technologies supporting virtual power plant interaction[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1761-1770(in Chinese).

- [71] 王宣元, 刘蓁. 虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 158-168.
WANG Xuanyuan, LIU Zhen. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 158-168(in Chinese).
- [72] 刘汝鸿, 粟娟. 面向数据保护的区块链物联网边缘卸载策略[J/OL]. 计算机应用研究, 2024: 1-9[2024-02-07]. <https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2023.11.0531>.
LIU Ruhong, LI Juan. Blockchain IoT edge offloading strategy for data protection[J/OL]. Application Research of Computers, 2024: 1-9[2024-02-07]. <https://doi.org/10.19734/j.issn.1001-3695.2023.11.0531>(in Chinese).



朱斌 6

5 在线出版日期: 2024-06-03。3
收稿日期: 2024-01-25。

作者简介: 4

朱斌(1999), 男, 博士研究生, 主要研究方向为7
电网信息物理系统、数字孪生, E-mail: zhubin-legolas
@sjtu.edu.cn;

刘东(1968), 男, 通信作者, 长聘教授, 主要8
研究方向为自动配电网、能源互联网、电网信息物
理系统、数字孪生、虚拟电厂, E-mail: dongliu@
sjtu.edu.cn;

刘天元(1992), 男, 助理研究员, 主要研究方9
向为能源互联网、电网信息物理系统、分布式系统,
E-mail: tianyuanl@sjtu.edu.cn。

(责任编辑 徐梅) 10

Research Progresses and Prospects on Application of Edge Computing in Power System Supply-demand Interaction¹

ZHU Bin¹, LIU Dong¹, LIU Tianyuan¹, WANG Jing², WANG Zhenshang², TANG Wenjun²²³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Minhang District, Shanghai 200240, China;
 2. Electric Power Research Institute (Shenzhen Power Supply Co., Ltd.), Shenzhen 518000, Guangdong Province, China)

KEY WORDS: edge computing; cloud computing; cloud-edge collaboration; supply-demand interaction; blockchain⁴

The supply-demand interaction as a flexible control method of power systems has been widely used to improve the operation efficiency of power systems, alleviate the problem of resource shortage, and promote the synchronous development of the environment, economy, and society. On the supply side, flexible power sources such as distributed power are scheduled to improve the efficiency of electricity utilization. The demand side adjusts its load within a reasonable range according to the adjustment requirements put forward by the power grid.⁵

With the development of the power Internet of Things, the number of terminal devices in the power grid has increased rapidly, which has significantly increased the amount of data generated by the power grid. Supply-demand interaction becomes more complicated with increased information and the diversification of information sources. The mainstream method of power system data processing is cloud computing, and edge computing, as a new computing paradigm, has been more and more applied to the field of power system data processing in recent years. Edge computing processes data through devices with specific computing capacity at the edge of the network, meeting the low latency requirements of some computing tasks and improving data processing efficiency. The cloud-edge computing structure in a power system is shown in Fig. 1.

For the research direction of applying edge computing to the supply-demand interaction of power systems, this paper reviews the relevant concepts and existing technologies of edge computing in power systems and prospects the future development of this field.⁷

This paper gives a comprehensive description of edge computing in power systems. It mainly expounds on the edge computing architecture, the development status of edge computing, and the development status of edge computing equipment in power systems.⁸

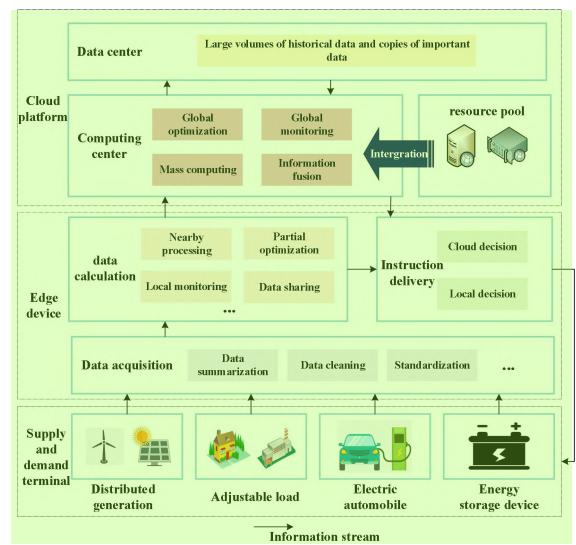


Fig.1 Cloud-edge computing architecture¹⁰

Secondly, several vital technologies commonly used in the supply-demand interaction are introduced, including the storage technology of the data required by the edge computing equipment, the intelligent decision technology of the edge computing terminal, the processing technology of the edge computing terminal, and the related technology to protect the data security.¹¹

Thirdly, the application status of edge computing in the supply-demand interaction is expounded. Power generation, transmission, transformation, distribution, and electricity utilization play different roles in the supply-demand interaction of the power system, and they work together to achieve the effective development and implementation of a supply-demand coordination strategy. This section describes the application of edge computing in these five links of supply-demand interaction.¹²

Finally, the application prospects of edge computing in the supply-demand interaction are prospected, including the further integration of edge computing with artificial intelligence and blockchain technology.¹³