

# 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法 及其应用现状与展望

白昱阳<sup>1</sup> 黄彦浩<sup>2</sup> 陈思远<sup>1</sup> 张俊<sup>1,3</sup> 李柏青<sup>2</sup> 王飞跃<sup>3</sup>

**摘 要** 本文分析了当前我国电力系统的运行与控制面临的挑战, 对边缘计算的发展背景和关键技术进行了介绍, 阐述了云边协同和边边协同的功能与特征, 并对边缘协同技术下的边缘智能技术进行了探讨. 结合电力系统的层级式构架, 讨论了在电网部署边缘计算层的方法, 提出利用云边协同、边边协同、边缘智能等技术解决电力系统面临的实时性高、数据周期短、任务复杂等难题, 在减轻边缘节点与云中心通信压力的同时, 提高业务服务质量, 保障边缘节点的数据隐私. 通过对边缘计算在“源-网-荷”各环节的应用前景进行分析与讨论, 阐述了边缘计算在电网中的可行性与实用性. 最后, 对边缘计算的应用范式与方案进行了总结, 并对其在未来电力系统中的发展方向进行了展望.

**关键词** 边缘计算, 云计算, 云边协同技术, 边缘智能, 电力系统运行控制

**引用格式** 白昱阳, 黄彦浩, 陈思远, 张俊, 李柏青, 王飞跃. 云边智能: 电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望. 自动化学报, 2020, 46(3): 397-410

**DOI** 10.16383/j.aas.2020.y000001

## Cloud-edge Intelligence: Status Quo and Future Prospective of Edge Computing Approaches and Applications in Power System Operation and Control

BAI Yu-Yang<sup>1</sup> HUANG Yan-Hao<sup>2</sup> CHEN Si-Yuan<sup>1</sup> ZHANG Jun<sup>1,3</sup> LI Bai-Qing<sup>2</sup> WANG Fei-Yue<sup>3</sup>

**Abstract** In this paper, the current challenges faced by China's power grid are analyzed, and the corresponding developmental background and key techniques of edge computing are introduced, including the functionalities and features of cloud-edge coordination and edge-edge coordination. Then, edge intelligence resulted from edge coordination is discussed. Considering the hierarchical architecture of power grids, the deployment of edge computing layer for power grid operation and control is illustrated in details. Through reducing communication data volume among edge nodes and the cloud center, the edge computing architecture and corresponding coordination mechanism aims to improve real-time performance of complex grid tasks, bring distributed intelligence to the system, while protecting data privacy of the edge nodes. Finally, the application paradigms of edge computing are summarized, and its future developmental directions in the power system operation and control are prospected.

**Key words** Edge computing, cloud computing, cloud-edge coordination, edge intelligence, power system operation and control

**Citation** Bai Yu-Yang, Huang Yan-Hao, Chen Si-Yuan, Zhang Jun, Li Bai-Qing, Wang Fei-Yue. Cloud-edge intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(3): 397-410

随着现代信息技术的发展和电网多元化需求的

增加, 提升电网运行的柔性弹性成为电力系统的迫切需求. 2019 年国家电网确立了智能化、数字化转型的关键战略目标, 旨在利用智能感知技术, 将移动互联、人工智能等现代信息技术和先进通信技术应用在电力系统中, 可应对复杂电力网络运行控制、海量信息、复杂应用需求等带来的挑战<sup>[1-4]</sup>. 随着电力系统的功能结构和技术特征的逐步转变, 电网运行与控制正面临全新的机遇与挑战. 边缘计算作为物联网应用的关键技术之一, 通过融合网络、存储、计算等技术在系统边缘侧提供数据服务, 可有效提升系统运行效率. 因此, 研究边缘计算与电力系统运行控制在多方向的深度融合技术, 实现海量

收稿日期 2019-11-08 录用日期 2019-12-01  
Manuscript received November 8, 2019; accepted December 1, 2019

国家电网公司科技项目 (XT71-19-032) 资助  
Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (XT71-19-032)

本文责任编辑 刘德荣  
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong  
1. 武汉大学电气与自动化学院 武汉 430072 2. 中国电力科学研究院有限公司 北京 100192 3. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192 3. State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

数据下复杂需求的实时响应,是全面推进电网智能化建设的必要一环。

本文在对电力系统运行与控制进行概述的基础上,分析了现阶段系统运行控制过程中存在的问题与挑战,基于边缘计算的主要技术方向构建了适用于电力系统的边缘计算服务框架,最后结合实际应用需求,探讨了边缘计算当前在智能发电控制、站域仿真分析、负荷建模中的应用方案。

## 1 电力系统运行与控制面临的挑战

电力系统是一个承载着海量信息的层次化物理网络,它通过源侧、网侧、荷侧、调度侧的信息交互和功能协同,解决所面临的实时非线性问题,实现电网的广域协调运行控制。近年来,信息通信技术、电力电子技术、人工智能技术等迅猛发展使得电力系统的运行特征正在发生深刻变化。新能源电源大量接入<sup>[5-7]</sup>、电力系统电力电子化<sup>[8-11]</sup>趋势明显等问题为电力系统的稳定特性带来了诸多风险,造成电网抵御故障的能力降低<sup>[12-13]</sup>、对稳控装置的依赖程度大幅提升<sup>[14-17]</sup>、动态无功储备不断下降<sup>[18-20]</sup>等影响,电力系统的精准、实时、等效的建模方法已成为迫切需求。同时,现有的电力系统“三道防线”是基于离线策略匹配的安稳控制模型,存在以低效换安全,容易发生失配安全风险的问题,难以满足当前和未来电网对安全和效率的现实需求。

现阶段,我国电网呈现出覆盖范围广、输电距离远、装机容量大、故障冲击强等特点,传统的稳态控制和保护策略难以有效抵御系统扰动冲击,负荷仿真控制也难以达到电网应用的精准实时性要求,从而难以真正实现电网的在线分析与广域协调。因此,研究边缘计算、云边协调等共性关键技术,构建基于边缘计算的电力系统运行框架,提出电力系统广域协调运行控制技术框架,是应对新一代电网发展中机遇和挑战的有效手段<sup>[21-23]</sup>。

## 2 边缘计算的发展背景与关键技术

### 2.1 边缘计算的发展与兴起

早在 90 年代,王飞跃研究员在文献[24]中提出了“当地简单,远程复杂(Local simple, remote complex)”的代理控制系统设计原理,即当地的控制器尽可能采取简单的算法,但这些简单的算法通过网络与远程的复杂算法在功能和结构上同构,以便利用远程的复杂计算和存储能力进行学习,提高性能;然后通过网络对当地的简单算法进行改进和修正,从而实现低成本、高性能、高智能的智能控制。在后续的工作中<sup>[25-30]</sup>,这一原理在结构和算法上得

到进一步完善。从当今边缘计算技术的视角看,该架构是在当时的通信计算条件下,实现分布式控制边缘智能的一种先进有效的思想方法与技术架构。而当前兴起的物联网、计算技术、人工智能技术,尤其是分布式人工智能技术,又赋予了边缘计算以新的能力与内涵。

物联网(Internet of things, IoT)通过各种信息传感器、智能识别、模式感知等装置与技术<sup>[31-35]</sup>,实现物与物之间、人与物之间的泛在连接,对系统内的物体或过程进行智能感知<sup>[36, 37]</sup>、识别<sup>[38-40]</sup>和管理<sup>[41-44]</sup>。相比于传统互联网框架,物联网中存在着巨量的终端设备,云计算模型无法有效地对智能终端产生的海量数据进行实时传输、计算和存储。因此,可将原有云端的部分业务分配到网络边缘侧进行处理,从而在保证系统整体性能的前提下满足各种任务的实时性要求<sup>[45-47]</sup>。

边缘计算,一种在物联网、人工智能、大数据及云计算快速发展形势下提出的新计算模式,可将具有计算、存储、应用等能力的智慧平台部署在靠近数据源头的网络侧,提供边缘意义上的智能服务,从而得到更快的网络服务响应,满足行业在实时业务<sup>[48-49]</sup>、应用智能<sup>[50-51]</sup>、安全与隐私保护<sup>[52-53]</sup>等方面的基本需求<sup>[54]</sup>。

边缘计算在工业界的发展也饱受关注,其潜力在世界范围内已被广泛认可。文献[55]对边缘计算的参考框架进行了描述,提出了该构架下计算资源下沉和任务分配的功能结构,并将一种基于深度强化学习的最优计算卸载方案部署在物联网系统中。边缘计算对智能联网设备的应用有着重要的作用,能极大促进人工智能解决方案的部署。随着 5G 通信技术与分布式人工智能技术的发展,使用边缘计算技术配合 5G 网络与人工智能实现物联网的边缘智能应用逐渐兴起<sup>[56-58]</sup>。

### 2.2 边缘计算与云计算

现代云计算平台依托于虚拟化服务技术,将系统的各类资源进行有效整合和管理,为用户提供了高效的计算服务和应用需求。云计算是一种简单的分布式计算,它能够将庞大的任务分解成无数个小任务,利用服务器群进行处理和分析,最后再将计算结果合并返回给用户<sup>[59-61]</sup>。然而,终端设备的大量接入暴露出云平台计算模型的局限性。据思科公司统计,2010 年连接互联网的终端设备多达 12.5 亿台,预计到 2020 年将达到 500 亿台<sup>[55]</sup>。云计算是将弹性的物理资源和虚拟资源以共享的方式进行服务供应与管理,而边缘计算是在网络的边缘节点以分布式处理和存储提供基于数据的服务。边缘计算通过在

网络边缘进行数据处理,降低云端网络核心节点的压力,是实现未来大规模智能终端分布式智能管理的一种理想解决方案。但是,边缘计算并不是云计算的替代品,而是对云计算的补充和延伸,它为边缘侧的终端设备提供了丰富、便捷、灵活的弹性资源<sup>[62-66]</sup>。

一般来说,边缘计算具有四个特点:1) 智能化:边缘计算可以与人工智能技术结合,使终端设备能够处理更加复杂的业务;2) 低时延:边缘计算平台将计算任务下沉到边缘侧,采用分布式计算在数据源头进行高效处理,可以有效地缩短响应时间<sup>[67]</sup>;3) 低能耗:边缘计算的分布式架构可以减少与云之间的数据传输和网络通道的占用,从而降低了数据处理成本和设备运行能耗<sup>[68]</sup>;4) 可靠性:分布式的边缘设备可以为系统提供就地计算和管理的功能,在云中心处理不及时或者通信故障的情况下,保证局部系统的稳定运行<sup>[69]</sup>。

边缘计算适用于实时、短周期的数据分析和本地决策等场景,而云计算适合非实时、长周期数据的大数据分析,因此,边缘计算与云计算的协同具有诸多优势<sup>[70]</sup>。边缘计算靠近数据的产生侧,是为云计算提供数据的采集单元,可以支撑云端的大数据应用,能缓解云平台的网络带宽、计算存储等方面的压力,云端通过大数据分析之后形成的计算结果和业务规则,也可以传输到边缘侧来提升终端业务处理能力。

## 2.3 边缘计算协同技术

### 2.3.1 云边协同

云边协同是最近受到关注的一种协同计算形式,也是相对较为成熟的一种技术模式。边缘计算是云计算的延伸,在云边协同中,云端负责大数据分析<sup>[71]</sup>、模型训练<sup>[72]</sup>、算法更新<sup>[73-74]</sup>等任务,边缘端负责基于就地信息进行数据的计算、存储和传输<sup>[75-78]</sup>。

一般来说,云边协同有三种模式<sup>[79]</sup>:1) 训练—计算的云边协同。云端根据边缘上传的数据对智能模型进行设计、训练和更新,边缘端负责搜集数据并实时下载最新的模型进行计算任务;2) 云导向的云边协同。云端除了承担智能模型的设计、训练和更新,也会承担模型前段的计算任务,然后将中间结果传输给边缘端,让边缘端继续计算而得到最终结果。该模式旨在权衡云端和边缘端的计算量和通信量;3) 边缘导向的云边协同。云端只负责初始的训练工作,模型训练完成之后下载到边缘端。边缘端在执行计算任务的同时,也会利用实时就地数据来对模型进行后续训练。该模式旨在满足应用的个性化需求,更好地利用局部数据。

现阶段,已有学者对于云边协同技术进行了深入的研究<sup>[80-83]</sup>。文献[84]提出一种双层的多云中心协同范式,利用上层云中心和边缘云的计算协同,有效地执行移动客户的复杂计算需求。文献[85]提出采用光纤无线接入网的体系结构,并采用近似协同计算卸载算法和博弈论来实现云端和移动边缘计算间的联合卸载。文献[86]在基于中心云与边缘云形成的分布式一体化形态上,探索全局化管理新框架,对云边协同的九大应用场景进行了探析。文献[87]对云边协同的发展潜力进行了分析,提出从多维度解决协同问题的方法。文献[88]基于云边协同的城市视觉计算平台,利用快速发展的人工智能技术构建了一个“城市大脑”,并将“城市大脑”用于城市目标识别、城市事件感知、城市交通治理、城市数字建模等方面,支撑城市管理中交通、公安、市政、教育、医疗等丰富多样的业务场景。云边协同将成为未来智能产业技术发展的重要趋势,使云计算和边缘计算互相作用弥补了不同应用场景下的短板。

### 2.3.2 边边协同

电力系统的任务往往具有复杂多样性,需要借助多源数据和多种算法才能完成。边缘计算将数据保存在数据生产者的位置,边缘计算设备也只具备有限的计算能力,这种边缘节点只与云端交互的模式会导致不同边缘节点相互独立、彼此孤立,形成数据孤岛和功能孤岛,影响应用服务质量。因此,边缘侧与边缘侧之间应该建立安全的通信机制,利用不同边缘端的就地信息进行数据共享与协同,从而在保护数据隐私的情况下提高应用服务质量<sup>[79]</sup>。

同样地,边边协同也有三种模式:1) 边边计算协同。云端的超算中心对模型和算法进行训练,根据边缘节点的情况将已训练好的模型进行下发,每个边缘计算服务器只执行一部分算法,最终通过协同的方式完成应用任务;2) 边边分布式训练协同。边缘计算服务器有完整的模型和算法,并利用边缘端数据承担模型和算法的训练任务,训练完成后的模型参数会更新到云端,最终得到完整模型;3) 边边联邦训练协同<sup>[89]</sup>。选取某个边缘保存完整的模型和算法,其他边缘节点作为计算节点参与模型和算法训练,并向该节点更新模型参数。联邦训练协同不同于分布式训练协同在于,联邦训练协同中的边缘计算可以自主决定是否参与模型的训练,而分布式训练协同是由云端进行控制和管理的。

边边协同主要是为了解决智能算法的资源需求与边缘设备资源受限间的矛盾,平衡应用服务质量和隐私保护<sup>[90-91]</sup>。文献[92]介绍了移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)在5G网络下的协同新范式、应用场景和挑战,证明了MEC之间的协

同能有效提高 5G 网络的应用效率。目前边边协同的应用较少,其协同机制还有待继续研究。文献[93]提出一个边缘计算协同框架,以支持在资源丰富的移动设备上对延迟敏感的多媒体物联网任务进行协同处理,关键是将视频块分配给合适的移动边缘视频处理组进行处理。文献[94]基于边缘计算中的隐私信任与安全保障问题,针对用户应用需求特征,充分考虑用户体验质量(QoE)来优化边缘计算系统的协同服务框架。文献[95]将边缘计算集成到低功耗广域网中,利用两个基站的能量协同完成计算任务。

## 2.4 边缘智能技术

深度学习、神经网络、强化学习等智能算法能部署在边缘计算的框架中,利用分布式的智能终端承担复杂系统的计算任务,为边缘侧应用提供强有力的支撑。现阶段,由于大部分的智能算法和模型较为复杂,边缘侧设备的性能一般难以满足要求,智能计算服务被部署在云中心以处理业务需求。然而,这样的中心式构架不能满足一些超实时应用的需求,如实时分析<sup>[96]</sup>、智能制造<sup>[97]</sup>等,因此在边缘侧部署智能算法能拓宽边缘计算的应用场景<sup>[98-101]</sup>。

以深度学习为例,深度学习是被广泛应用在电力系统中的一种智能算法,它要求边缘计算设备需要具有相应的承载算力。基于前述云边协同技术,云中心将训练好的深度学习模型进行分割,并下沉到不同的边缘节点,边缘节点下层智能终端对采集

的数据进行预处理,边缘节点利用熟数据和卷积神经网络(Convolutional neural network, CNN)进行计算并返回结果给云中心,云中心将边缘节点返回的结果输入到全连接卷积神经网络(Fully-connected convolutional neural network, FCNN)得出最终的结果值<sup>[94]</sup>。边缘智能的构架如图1所示。

现阶段,深度学习的训练都放在云中心,而训练数据都在边缘侧,这种模式并不适用于所有的深度学习应用场景,尤其对于一些需要本地信息和持续迭代训练的应用<sup>[102-103]</sup>。海量数据的传输需要占用通信通道的资源,这不仅会带来极大的网络资源消耗,也难以确保信息传输的可靠性。另外,边缘侧的部分数据涉及边缘节点中终端用户的隐私,将所有数据上传给云中心也不是一个实际的做法<sup>[104]</sup>。因此,应该将带有稳定计算资源的边缘计算节点看作多个训练中心,在本地采集信息并进行数据预处理和模型训练。这种训练方式需要结合边缘导向的云边协同和边边联邦训练协同两种模型,训练示意图如图2所示,主要有以下几个步骤<sup>[105]</sup>: 1) 云中心将初步训练的深度学习模型完整地发给某个边缘节点,这个边缘节点可以被称为聚合服务器(Aggregation server, AS); 2) 边缘节点参与 AS 的模型训练,利用他们的本地数据训练局部模型; 3) 边缘计算节点将更新的局部模型发送 AS, 得到更新后的全局模型。这种模型训练方法在保护边缘节点的数据隐私和安全的前提下,减小了整个系统的通信压

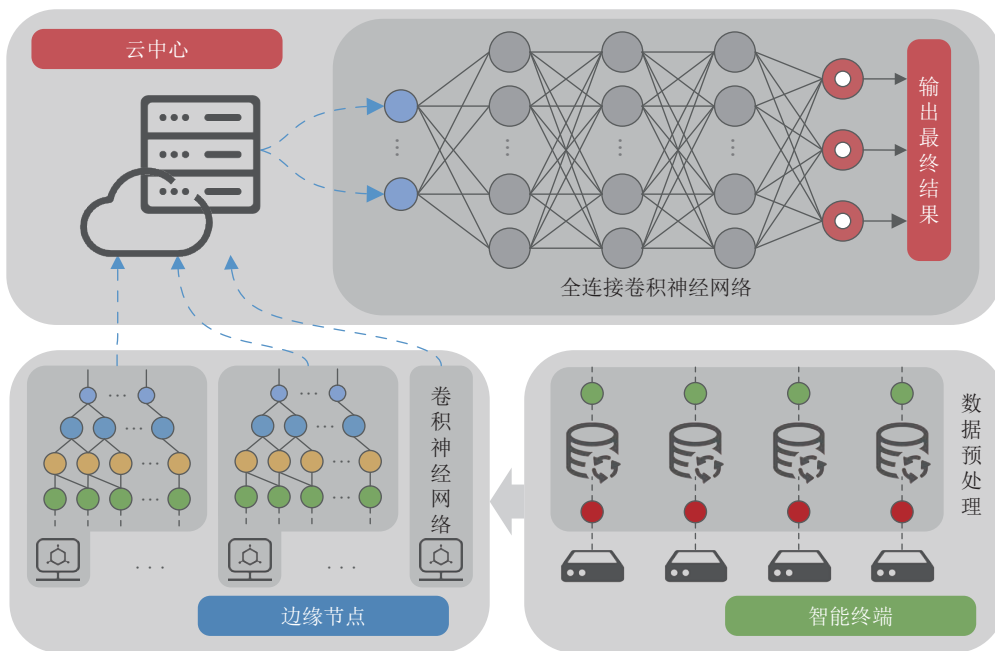


图1 边缘智能架构

Fig. 1 The architecture of edge intelligence

力,增加了模型训练的可靠性。

### 3 电力系统的边缘计算服务框架

在传统的电力系统中,源侧、网侧、荷侧的参数和信息都会发送给调度侧的云中心,利用云超算中心实现广域发电控制、线路参数辨识和故障识别、负荷建模及调节水平评估、电网动态安全稳定评估等应用。源侧的数据通过直接采集和上传到调度中心 D5000 平台中,经过电网状态估计、安全校核等过程进行发电调度计划,考虑到制定调度计算所需的数据量不会太大,其数据处理和分析不会为调度中心带来过于沉重的负担。然而,在实际电网运行中,调度中心需要对发电侧和负荷侧进行等值建模,对网侧进行运行状态实时评价、对电网保护动作进行评价和安全风险分析,这些任务需要的复杂多源数据将会给电力系统北向通信通道带来沉重的负担。同时,考虑到通信堵塞带来的数据延时和掉包,会对电网运行状态评价、保护动作的安全风险分析等实时性要求很高的任务带来极大的影响,甚至危害到电力系统的安全。

基于电力系统的“源-网-荷”层次化结构,电网主要业务结构又可以分为调度应用层、厂站应用层和基础数据层。边缘计算层可以部署在厂站应用层和基础数据层之间,对终端采集设备的数据进行边缘化处理,再将处理好的数据进行上传和存储。对应于厂站应用和调度应用,边缘计算平台通过南向、北向通信接口提供所需要的数据,极大地提高了数据的价值密度和传输速度。变电站是电网中的重要节点,担负着变换电压等级、汇集电流、分

配电能、控制电能流向、调整电压的功能<sup>[106]</sup>。因此,承载着电子互感器、智能开关、高速网络通信等技术的数字化变电站系统可以作为电网的边缘计算节点,通过在数字化变电站部署边缘计算平台,利用变电站与调度中心的云边协同对新能源和常规电源的参数进行在线辨识,利用变电站与变电站之间的边边协同实现电网广域协调控制、区域保护、负荷建模和调节能力评估等功能,同时边边协同还可以联合电网平行仿真平台对电网在线工况进行推演和反推演,为电网运行提供更可靠、高效、稳定和开放的保障,电力系统边缘计算节点部署示意图如图 3 所示。值得注意的是,边缘计算也可以与电网的平行仿真平台进行交互,通过平行仿真平台产生的数据对自身的算法和模型进行更新,以应对时变的电力系统运行工况与业务需求。

边缘计算部署的关键在于边缘节点如何获取数据、需要获取哪些数据以及如何使用智能技术满足电网各个环节业务需求。在电力系统原有的通信框架和标准不变的条件下,源侧数据可以从调度中心的 D5000 平台导出电厂出线端 PMU 采集的数据,在发电厂内部署边缘计算服务器,对电源模型参数尤其针对较为复杂的新能源模型,利用深度学习、强化学习等智能算法进行在线辨识和实时等值参数建模;网侧数据和负荷侧数据由电网中的智能终端和合并单元采集,通过光纤、无线等传输以报文方式上传至变电站综自系统,由于边缘计算节点布置在变电站内,可以直接利用以太网通信将报文发送给边缘计算平台,由边缘计算平台进行解析和存储。边缘计算可以利用 MMS (Manufacturing message

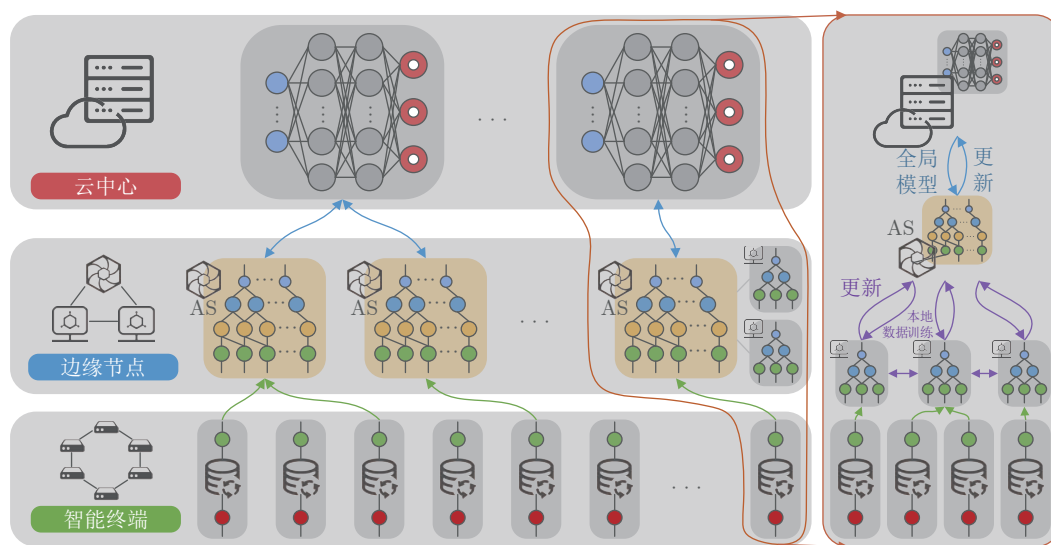


图 2 云边协同和边边联邦协同的联合训练框架

Fig. 2 Joint training framework for cloud-edge collaboration and edge-edge federation collaboration



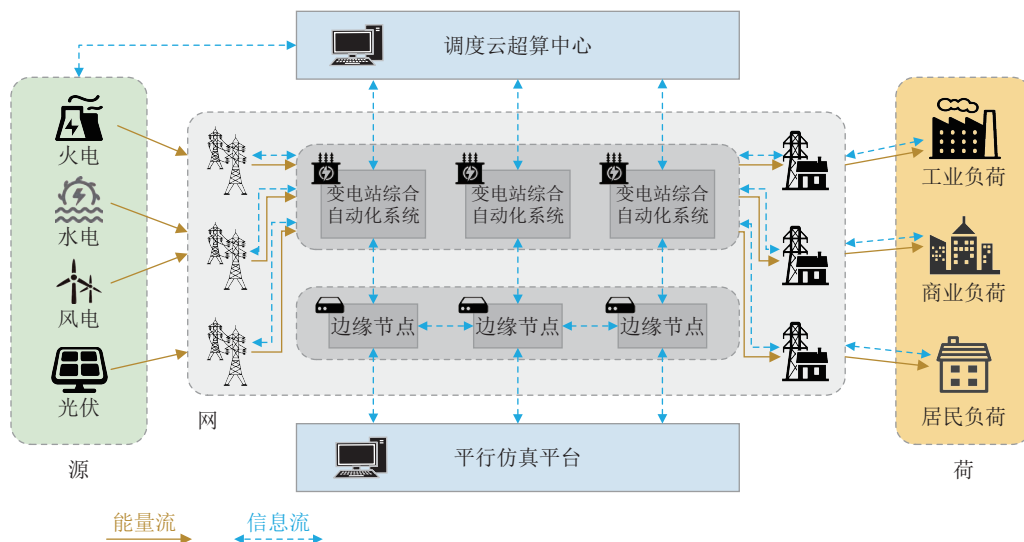


图3 边缘节点在电力系统中的部署示意图

Fig. 3 Schematic diagram of edge node deployment in power system

specification) 报文和 GOOSE (Generic object oriented substation events) 报文解析之后的数据进行变电站站域平行仿真, 对变电站的未来工况进行推演与反推演; 也可以利用负荷侧数据和用户侧综合能源数据生成变电站下级电网的负荷模型, 并评估其负荷调节能力; 通过解析包含站域数据的 SV (Sample value) 报文和 GOOSE 报文, 利用深度学习、强化学习等智能算法进行故障特征提取、稳定性判别、控制策略制定等, 可以对变电站的站域进行保护控制。最终, 调度中心与边缘计算层会进行云边协同通信, 调度中心下发仿真数据、站域分析任务、算法模型等, 边缘计算层上传站域分析结果、发电模型参数、负荷模型和综合能源信息等, 电力系统边缘计算数据通信框架图如图 4 所示。

## 4 应用场景

### 4.1 电力系统广域智能发电控制

电力系统的实时功率平衡特性使得发电控制成为一项重要的研究课题, 电力系统的发电控制也被称为负荷频率控制 (Load frequency control, LFC)。电网频率是影响电力系统稳定运行的关键参数, 发电控制的目标就是在平衡发电机与负荷之间功率的同时调节电网频率稳定。电网的频率调节方案有一次调频、二次调频和三次调频, 三种调频方案相互配合才能维持有功功率平衡和减少系统频率偏差。从整体上来看, 电力系统的一次调频特性与所有并列运行的发电机组特性相关, 也与机组所处的工况和机组间的相互作用有关<sup>[107]</sup>。二次调频也称为自动

发电机控制, 是利用监视控制和数据采集来实现系统的无差调节。三次调频则涉及到对负荷功率的预测、机组组合问题和经济调度问题, 本文不讨论三次调频。机组的一次调频特性模型, 以及一次调频和二次调频的配合策略可以利用边缘计算进行建模与训练, 为调度中心的发电控制策略制定提供新的工具。

源侧的发电机组出线端会有多个数据采集终端, 例如远程终端单元 (Remote terminal unit, RTU)、同步相量测量装置 (Phasor measurement unit, PMU) 等, 它们采集的数据分别上传至 SCADA (Supervisory control and data acquisition)、WAMS (Wide area measurement system)、OMS (Operations management system) 等系统, 将机组的有功数据、一次/二次调频响应动作数据等从调度中心 D5000 系统中取出导入到边缘计算层。在边缘计算层建立发电机组一次调频模型, 利用 D5000 系统对机组一次/二次调频性能进行在线测试, 将发电机的转速偏差信息发送给电厂的分散控制系统 (Distributed control system, DCS), 电厂的机组根据接收的信号进行一次/二次调频动作响应, 在测试期间发电厂的 PMU 会自动同步采集机组的有功出力数据, 并将数据上传到 D5000 系统。采用边缘导向的云边协同模式, 调度中心将机组的一次/二次调频模型下发至边缘计算, 边缘计算从 D5000 中获取对应数据并利用深度学习等智能算法继续对模型进行训练与更新。考虑到每个时刻的经济调度方案都在调度中心完成, 这种协同方式可以采用云导向的云边协同方式, 调度中心根据制定的日前调度计划训练初步的发电控制模型, 然后再将模型下发给边

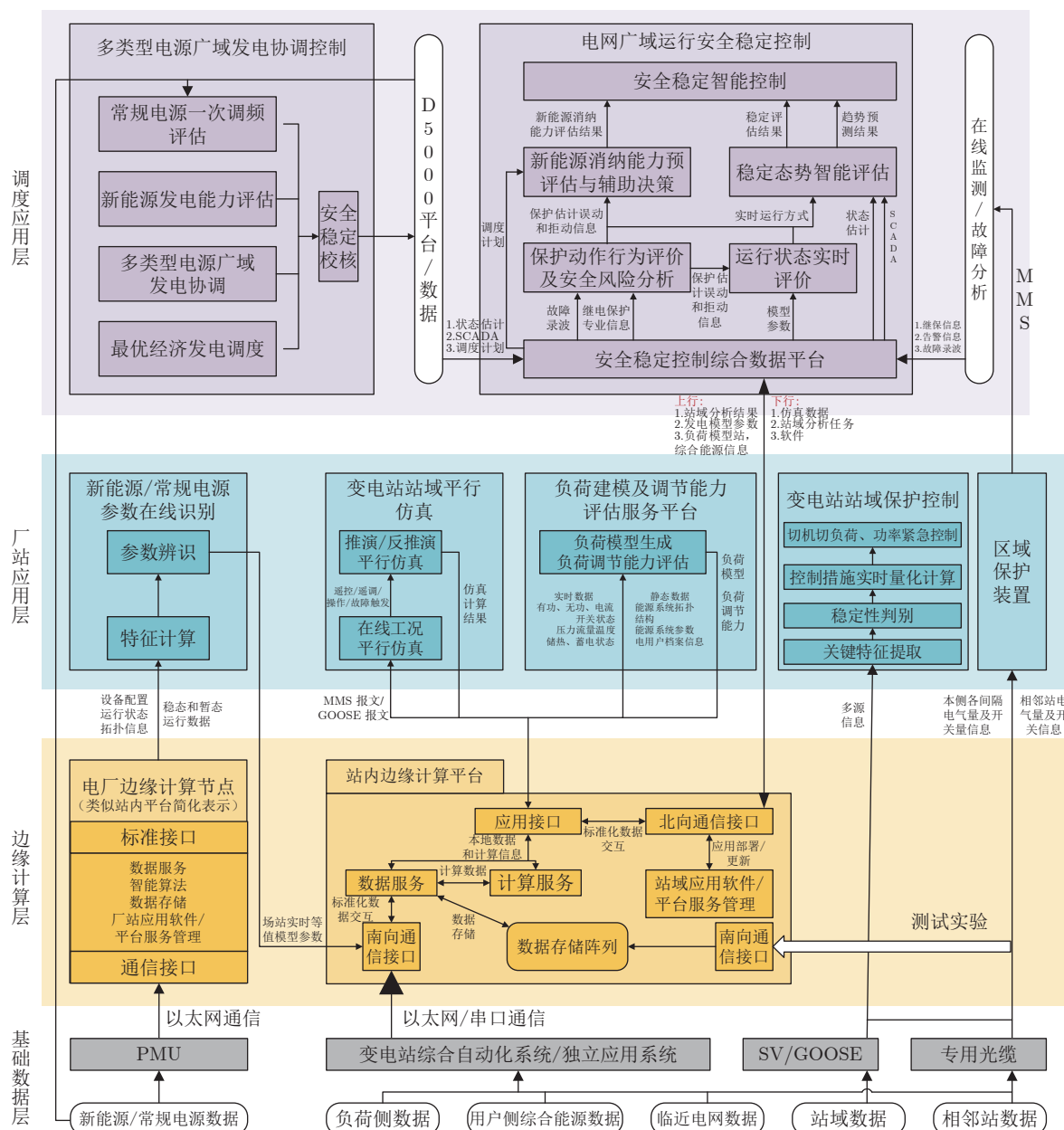


图4 边缘计算平台在电力系统中的应用框架

Fig. 4 Application framework of edge computing platform in power system

缘计算进行训练与更新, 边缘计算对常规电源一次调频能力、新能源机组模型参数辨识、多类型电源协调控制策略进行建模分析, 并将最终的结果返回到调度中心。

#### 4.2 变电站站域仿真分析与控制保护

变电站是电网中的重要节点, 担负着变换电压等级、汇集电流、分配电能、控制电能流向、调整电压的功能<sup>[108]</sup>。数字化变电站除了变换电压、接收和分配电能等功能外, 还能获取电能和电网信息, 为

电网的运行提供所需要的数据, 其综合自动化系统结构图如图5所示。变电站需要监测的线路、开关断路器等二次设备数量庞大, 合并单元由线路中的电子互感器构成用于上传线路的电气量, 智能终端则上传其所控制的开关状态量。SV报文和GOOSE报文都是IEC61850通信协议中的标准报文格式, 分别对应线路状态值和开关状态量, 这些报文由过程层传至间隔层, 间隔层根据报文内容进行线路稳定控制和继电保护动作, 然后将保护和控制信息以MMS报文上传至站控层, 最后由站控层的远动主

机通过 IEC61850-5-104 协议传给调度中心, 等待调度中心的分析结果和任务下发。然而, 变电站的站域保护和线路保护都有极低延时的要求, 由报文解析、通信阻塞、网络丢包等因素带来的影响将会对电网运行带来危害和隐患。因此, 可以将边缘计算平台部署在站控层, 通过抓取和解析 MMS 报文, 将部分信息进行就地处理和存储, 在保证应用服务质量的前提下减少对远动通信带来的负担。

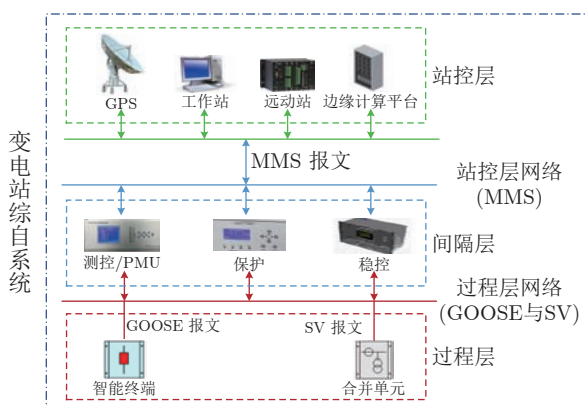


图 5 变电站综自系统结构图

Fig. 5 Structure of integrated automation system of substation

边缘计算平台在变电站中部署的数据交互示意图如图 6 所示。通过与变电站综合自动化系统交互, 边缘计算平台可以从变电站综合自动化系统获取包含变电站同级电网信息的 MMS 报文, 通过解析、存储、计算等过程进行数据处理和存储; 通过与变电站远动主机的下行信息交互, 根据调度下发的任务和参数, 进行任务需求分析、电网数据监听、程序算法更新等功能; 将调度下发的任务和相关的参数与算法更新到边缘智能计算服务中, 利用更新后的深度学习、神经网络、强化学习等智能算法和模型对数据的关键特征进行提取, 并进行站域稳定性判别, 若判定为故障则进行控制措施量化计算和控制策略制定; 将边缘智能计算服务的分析结果和辅助决策通过北向通信服务通道, 经由变电站站控层远动主机上行发送至调度中心。值得注意的是, 考虑到电网保护控制的安全可靠性要求, 该应用场景中采用的是云导向的边云协同模式, 由调度中心对站域保护的模型和算法进行训练, 最后将训练完成后的算法与模型进行下发。

#### 4.3 负荷建模及调节能力评估

负荷建模对维持电网安全稳定运行和提高用户供电可靠性有着重大意义, 而其调节能力评估可以

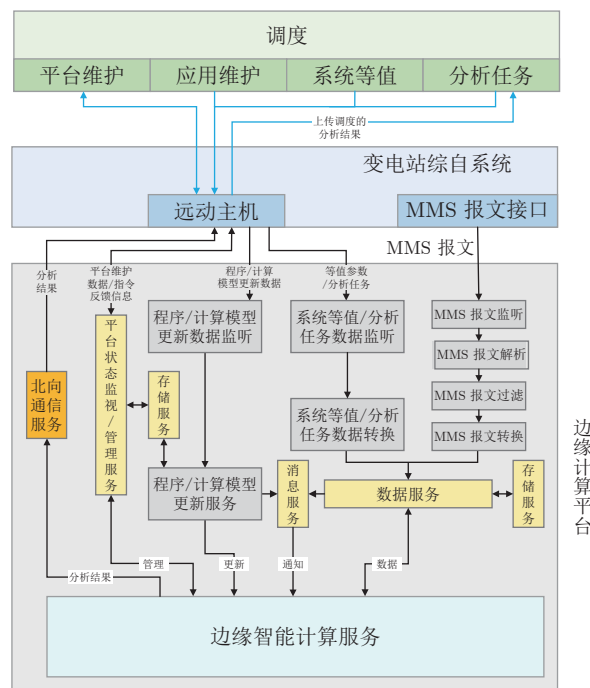


图 6 边缘计算在变电站中的数据交互示意图

Fig. 6 Data interaction diagram of edge computing in substation

为源侧的生产和网侧的运行提供更可靠的支撑。负荷建模的精确度对电力系统动态行为的定量模型影响很大, 一般来说可以分为静态模型、机理动态模型和非机理动态模型, 其中机理动态模型可以用于描述电压或频率较快变化时的负荷特性, 有利于协助电力系统维持暂态稳定、小扰动稳定和电压稳定。目前, 负荷模型的参数辨识方法有很多种, 但均需要海量的数据作为支撑 (例如, 综合统计法和总体测算法), 某些只需小样本数据的方法 (例如, 故障仿真法) 存在严重的局限性。此外, 电力系统是一个分层结构, 从居民负荷、工业负荷、商业负荷到配电变电站, 从配电变电站到输电变电站, 从输电变电站到发电厂和调度, 负荷数据需要利用智能终端采集并逐级上传, 最终在调度中心利用统计综合法得到负荷模型和参数, 这种方法显然会对通信网络带来很大负担, 同时, 也会面对数据私密问题的挑战, 而且无法实现负荷参数的在线辨识。

考虑到负荷数据由终端采集装置通过上行传至边缘计算平台, 可以利用边边分布式训练协同获得更为精确的负荷模型。在配电变电站部署边缘计算服务器, 利用智能电表的电压、电流采样值训练深度神经网络模型, 如递归神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN), 获得低电压等级负荷的模型和参数, 通过同一电压等级变电站的边缘计算服务器进行协同, 经分析整理后将负荷模型上传至输电变



站从而获的高电压等级的负荷模型结构, 依此类推逐层进行边缘协同获得最终所需要的各层级电网的负荷模型和参数, 其结构流程图如图 7 所示. 这种基于边缘计算协同的负荷建模方法不仅减轻了通信压力, 而且提高了所建立模型的精准度. 同时, 各级电网的负荷模型都会保存在变电站的边缘计算服务器中, 并通过智能终端采集的电压、电流值进行不断地实时更新与修正, 实现负荷特性的自动识别与仿真模型参数的自动生成. 输电变电站会将负荷模型逐级上传至调度中心, 为调度中心提供不同负荷类型的变化特性和统计规律, 评估不同电网运行场景下的负荷调节能力, 并利用云边协同技术为电网的实时调度与运行决策提供更精确的负荷特性模型.

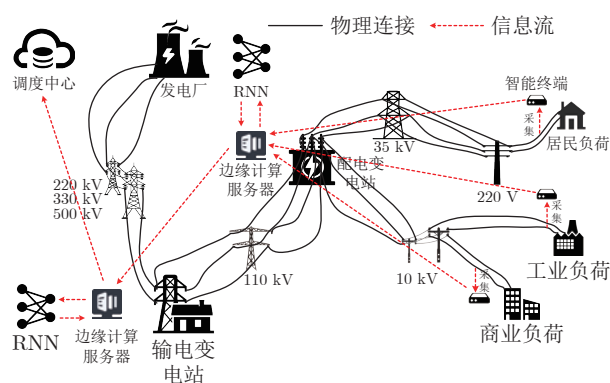


图 7 负荷建模边缘计算构架图

Fig. 7 The architecture diagram of edge computing for load modelling

## 5 结论

边缘计算作为新兴计算系统范式的代表, 是提升电力系统的在线分析、稳定运行和紧急控制等能力的有效手段, 为满足电力系统的多元化运行和控制需求提供了可靠的方法和平台. 本文通过介绍边缘协同和边缘智能这两大基础赋能技术, 研究了适用于电力系统的边缘计算应用范式和服务框架, 并提出了边缘计算在广域发电控制、站域保护控制与负荷建模评估三大应用场景下的技术分析和应用方案, 为后续相关研究提供了思路与参考.

边缘计算的核心优势在于, 通过协同技术与智能算法的融合, 可高效地解决传统中心化电力系统无法求解的复杂计算任务, 同时减少边缘侧与云中心的数据通信, 增加系统的安全可靠性, 保护边缘侧数据隐私. 目前, 边缘计算已经呈现出越来越成熟的技术规范, 将为电力系统运行与控制中各环节业务提供安全可靠、高效稳定的应用服务, 也为电网高度智能化的建设提供强有力的技术支撑.

## References

- 1 Zhang Yang. Association Rule Incremental Updating Algorithm and Its Application in Cloud [Master thesis], Beijing University of Chemical Technology, China, 2016  
(张杨. 云环境下的关联规则增量更新算法及其应用 [硕士学位论文], 北京化工大学, 中国, 2016)
- 2 Zheng Ya-Jun. Association Rules Incremental Updating Research and Application Based on MapReduce [Master thesis], Hefei University of Technology, China, 2014  
(郑亚军. 基于 MapReduce 的关联规则增量更新算法研究及应用 [硕士学位论文], 合肥工业大学, 中国, 2014)
- 3 Mao Y Y, You C S, Zhang J, Huang K B, Letaief K B. A survey on mobile edge computing: the communication perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, **19**(4): 2322-2358
- 4 Wang Y, Tao X F, Zhang X F, Zhang P, Hou Y T. Cooperative task offloading in three-tier mobile computing networks: an ADMM framework. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, **68**(3): 2763-2776
- 5 Yue Lian-Zhong. Application of intelligent technology in power system automation. *Value Engineering*, 2019, **38**(34): 222-223  
(岳连忠. 智能技术在电力系统自动化中的应用. 价值工程, 2019, **38**(34): 222-223)
- 6 Rao Yu-Fei, Cui Wei, Liu Wei, Fang Zhou, Meng Gao-Jun. A stability control strategy for power systems based on active splitting algorithm. *Electrical Automation*, 2019, **41**(5): 73-76  
(饶宇飞, 崔惟, 刘巍, 方舟, 孟高军. 一种基于主动解列算法的电力系统稳定控制策略. 电气自动化, 2019, **41**(5): 73-76)
- 7 Xie Ji-Ping, Zhang Wen, Yang Hao. Coordinated control for middle-long-term voltage stability of AC/DC power system considering dc modulation. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, **43**(22): 76-83  
(谢季平, 张文, 杨浩. 考虑直流调制的交直流系统中长期电压稳定协调控制. 电力系统自动化, 2019, **43**(22): 76-83)
- 8 Yi Wei. Transient Stability Control of Power System Considering Excitation Saturation and Turbine Governor [Master thesis], Shandong University, China, 2019  
(易维. 考虑励磁限幅和发电机调速器的电力系统暂态稳定控制 [硕士学位论文], 山东大学, 中国, 2019)
- 9 Liu Jun-Lei, Qian Feng, Wu Shuang-Xi, Yang Yin-Guo, Sun Bai-Zhe. Online evaluation of dynamic reactive power demand of DC receiving power grid based on SVR. *Power System Protection and Control*, 2019, **47**(13): 37-45  
(刘俊磊, 钱峰, 伍双喜, 杨银国, 孙百哲. 基于支持向量回归的直流受端电网动态无功需求在线评估. 电力系统保护与控制, 2019, **47**(13): 37-45)
- 10 Yan Xiang-Wu, Xu Yun. Multiple time and space scale reactive power optimization for distribution network with multi-heterogeneous RDG participating in regulation and considering network dynamic reconfiguration. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, **34**(20): 4358-4372  
(颜湘武, 徐韵. 考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化. 电工技术学报, 2019, **34**(20): 4358-4372)
- 11 Yan Xiang-Wu, Xu Yun, Li Ruo-Jin, Jin Yong-Sheng, Li Tie.

- Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including RDG regulation. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, **34**(10): 2022–2037  
(颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 金永盛, 李铁. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化. 电工技术学报, 2019, **34**(10): 2022–2037)
- 12 Liu Ying-Ming. Design of intelligent management system for training room based on internet of things technology. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019, (20): 44–45  
(刘英明. 基于物联网技术的实训室智能管理系统设计. 电子技术与软件工程, 2019, (20): 44–45)
- 13 Yu Yang, Zhu Shao-Min, Bian Chao-Yi. Knowledge graph based ubiquitous power IoT security visualization technology. *Telecommunications Science*, 2019, **35**(11): 132–139  
(余洋, 朱少敏, 卞超轶. 基于知识图谱的泛在电力物联网安全可视化技术. 电信科学, 2019, **35**(11): 132–139)
- 14 Zhang Zai-Chen. Key supporting technologies for ubiquitous electricity internet of things. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, **38**(6): 1  
(张在琛. 泛在电力物联网关键支撑技术. 电力工程技术, 2019, **38**(6): 1)
- 15 Zeng Ming, Wang Yu-Qing, Yan Tong, Lan Meng-Xin, Dong Hou-Qi, Zhang Xiao-Chun, et al. System design and model research of renewable energy policy evaluation system based on platform of ubiquitous power internet of things. *Power System Technology*, 2019, **43**(12): 4263–4273  
(曾鸣, 王雨晴, 闫彤, 兰梦心, 董厚琦, 张晓春, 等. 基于泛在电力物联网平台的可再生能源政策评估系统设计与模型研究. 电网技术, 2019, **43**(12): 4263–4273)
- 16 Wang Yi, Chen Qi-Xin, Zhang Ning, Feng Cheng, Teng Fei, Sun Ming-Yang, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects. *Power System Technology*, 2019, **43**(5): 1575–1585  
(王毅, 陈启鑫, 张宁, 冯成, 滕飞, 孙铭阳, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望. 电网技术, 2019, **43**(5): 1575–1585)
- 17 Jiang Xiu-Chen, Liu Ya-Dong, Fu Xiao-Fei, Xu Peng, Wang Shao-Qing, Sheng Ge-Hao. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power internet of things. *High Voltage Engineering*, 2019, **45**(5): 1345–1351  
(江秀臣, 刘亚东, 傅晓飞, 徐鹏, 王劭菁, 盛戈皞. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势. 高电压技术, 2019, **45**(5): 1345–1351)
- 18 Zhang Xiao-Hua, Liu Dao-Wei, Li Bai-Qing, Feng Chang-You. The concept of intelligent panoramic system and its application system in modern power grid. *Proceedings of the CSEE*, 2019, **39**(10): 2885–2894  
(张晓华, 刘道伟, 李柏青, 冯长有. 智能全景系统概念及其在现代电网中的应用体系. 中国电机工程学报, 2019, **39**(10): 2885–2894)
- 19 Chen L, Deng Z, Xu X. Two-Stage Dynamic Reactive Power Dispatch Strategy in Distribution Network Considering the Reactive Power Regulation of Distributed Generations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, **34**(2): 1021–1032
- 20 Liu Yu-Bo. Research and Design of Artificial Intelligence Training Platform Based on Cloud Computing [Master thesis]. Beijing University of Posts and Telecommunications, China, 2019  
(刘宇博. 基于云计算的人工智能训练平台的研究与设计 [硕士学位论文], 北京邮电大学, 中国, 2019)
- 21 Wang S, Zhang X, Zhang Y, Wang L, Yang J W, Wang W B. A survey on mobile edge networks: Convergence of computing, caching and communications. *IEEE Access*, 2017, **5**: 6757–6779
- 22 Nikoobakht A, Mardaneh M, Aghaei J, et al. Flexible power system operation accommodating uncertain wind power generation using transmission topology control: an improved linearised AC SCUC model. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, **11**(1): 142–153
- 23 Zhang Xing-Zhou, Lu Si-Di, Shi Wei-Song. Research on collaborative computing technology in edge intelligence. *AI-View*, 2019, (5): 55–67  
(张星洲, 鲁思迪, 施巍松. 边缘智能中的协同计算技术研究. 人工智能, 2019, (5): 55–67)
- 24 Wang F Y. Shadow Systems: a New Concept for Nested and Embedded Cosimulation for Intelligent Systems. Tucson, Arizona, USA, 1994
- 25 Wang F Y, Kim H M. Implementing adaptive fuzzy logic controllers with neural networks: a design paradigm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, 1995, **3**(2): 165–180
- 26 Wang Fei-Yue, Huang Xiao-Chi. The status quo and future prospective of internet-based intelligent residential systems. *Science and Technology of Household Electric Appliance*, 2001, (6): 56–61  
(王飞跃, 黄小池. 基于网络的智能家居系统现状和发展趋势. 家用电器科技, 2001, (6): 56–61)
- 27 Wang Fei-Yue, Wang Cheng-Hong. On some basic issues in network-based direct control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(S1): 171–176  
(王飞跃, 王成红. 基于网络控制的若干基本问题的思考和分析. 自动化学报, 2002, **28**(S1): 171–176)
- 28 Wang Fei-Yue. Intelligent control and management for networked systems in a connected world. *PR & AI*, 2004, **17**(1): 1–6  
(王飞跃. 连通环境下联网系统的智能控制与管理问题. 模式识别与人工智能, 2004, **17**(1): 1–6)
- 29 Wang F Y. Agent-based control for networked traffic management systems. *IEEE Intelligent System*, 2005, **20**(5): 92–96
- 30 Wang F Y, Liu D R. Networked Control Systems: Theory and Applications. London: Springer, 2008
- 31 Xu Jing. Application analysis of Internet of things technology in smart grid monitoring. *Computer Products and Circulation*, 2019, (12): 81  
(徐晶. 物联网技术在智能电网监测中的应用分析. 计算机产品与流通, 2019, (12): 81)
- 32 Yang Zi-Yuan, Xu Xiao-Bin, Li Xin, Zhao Yi-Meng. Research on appliance event detection method based on intelligent perception technology. Chinese Journal on Internet of Things [Online], available: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1491.TP.20191226.1020.006.html>, December 27, 2019  
(杨子元, 许晓斌, 李欣, 赵一萌. 基于智能感知技术的用电事件识别方法研究. 物联网学报 [Online], available: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1491.TP.20191226.1020.006.html>, December 27, 2019)

- cnki.net/kcms/detail/10.1491.TP.20191226.1020.006.html, December 27, 2019)
- 33 Shi Wei, Chen Xiang-Guo, Wei Zhong-Cheng, Li Peng, Zhao Ji-Jun. Smart home environment awareness and security alarm system based on NB-IoT. *Computer Knowledge and Technology*, 2019, **15**(29): 194–197, 207  
(时薇, 陈湘国, 魏忠诚, 李鹏, 赵继军. 基于 NB-IoT 的智能家居环境感知及安防报警系统. 电脑知识与技术, 2019, **15**(29): 194–197, 207)
  - 34 Zhang Li, Wang Zhuo-Yue, Wang Chun-Dong, Ma Yun-Fei, Xiang Chao-Can. Design and implementation of intelligent identification system for IoT terminals. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2019, **31**(4): 443–450  
(张立, 汪卓越, 王春东, 马云飞, 向朝参. 物联网终端智能识别系统设计与实现. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2019, **31**(4): 443–450)
  - 35 Qi Jun-Peng, Tian Meng-Fan, Ma Rui. Application and development of radio frequency identification technology for internet of things. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(29): 1–10  
(齐俊鹏, 田梦凡, 马锐. 面向物联网的无限射频识别技术的应用及发展. 科学技术与工程, 2019, **19**(29): 1–10)
  - 36 Zhang Juan-Ping. Application of face recognition and contrast technology in intelligent transportation of internet of things. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019, (16): 166–167  
(张娟萍. 人脸识别与对比技术在物联网智能交通中的应用. 电子技术与软件工程, 2019, (16): 166–167)
  - 37 Luo Xiao-Qing, Hu Rong, Hong Sheng-Hua, Xiong-Ting. Simulation of Intelligent Sensing Digital Image Adaptive Enhancement for Internet of Things. *Computer Simulation*, 2018, **35**(12): 271–275  
(罗小青, 胡荣, 洪胜华, 熊婷. 物联网智能感知数字图像自适应增强方法仿真. 计算机仿真, 2018, **35**(12): 271–275)
  - 38 Gu Guang-An. Research on closed intelligent management platform of chemical industry park based on internet of things. *Information and Communications Technologies*, 2019, **13**(5): 52–57  
(顾广安. 基于物联网的化工园区封闭化智慧管理平台研究. 信息通信技术, 2019, **13**(5): 52–57)
  - 39 He Xue, Huang Chao-Yu. Intelligent management system of modern agricultural eco-park based on internet of things. *Machinery & Electronics*, 2019, **37**(9): 47–50  
(何雪, 黄超禹. 基于物联网的现代农业生态园区智能管理系统. 机械与电子, 2019, **37**(9): 47–50)
  - 40 Xu Yong-Jie. Application of Internet of things technology in intelligent warehouse management system. *Information Recording Materials*, 2019, **20**(9): 232–233  
(徐永杰. 物联网技术在智能仓库管理系统中的应用. 信息记录材料, 2019, **20**(9): 232–233)
  - 41 Amarasinghe G, de Assunção M D, Harwood A, Karunasekera S. A data stream processing optimisation framework for edge computing applications. In: *Proceedings of the 21st IEEE International Symposium on Real-Time Distributed Computing*. Singapore, Singapore: IEEE, 2018. 91–98
  - 42 Gu L, Zeng D Z, Guo S, Barnawi A, Xiang Y. Cost efficient resource management in fog computing supported medical cyber-physical system. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, **5**(1): 108–119
  - 43 Liu C, Cao Y, Luo Y, Chen G L, Vokkarane V, Ma Y S, et al. A new deep learning-based food recognition system for dietary assessment on an edge computing service infrastructure. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2018, **11**(2): 249–261
  - 44 Sodhro A H, Pirbhulal S, de Albuquerque V H C. Artificial intelligence-driven mechanism for edge computing-based industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(7): 4235–4243
  - 45 Li Y H Z, Dong Z Y, Sha K W, Jiang C F, Wan J, Wang Y. TMO: time domain outsourcing attribute-based encryption scheme for data acquisition in edge computing. *IEEE Access*, 2019, **7**: 40240–40257
  - 46 Zhang Cong, Fan Xiao-Yi, Liu Xiao-Teng, Pang Hai-Tian, Sun Li-Feng, Liu Jiang-Chuan. Edge computing enabled smart grid. *Big Data Research*, 2019, **5**(2): 64–78  
(张聪, 樊小毅, 刘晓腾, 庞海天, 孙立峰, 刘江川. 边缘计算使能智慧电网. 大数据, 2019, **5**(2): 64–78)
  - 47 Gong Gang-Jun, Luo An-Qin, Chen Zhi-Min, Luan Jing-Zhao, An Xiao-Nan, Wang Xue-Bei, et al. Cyber physical system of active distribution network based on edge computing. *Power System Technology*, 2018, **42**(10): 3128–3135  
(龚钢军, 罗安琴, 陈志敏, 栾敬钊, 安晓楠, 王雪蓓, 等. 基于边缘计算的主动配电网信息物理系统. 电网技术, 2018, **42**(10): 3128–3135)
  - 48 Zhang Jia-Le, Zhao Yan-Chao, Chen Bing, Hu Feng, Zhu Kun. Survey on data security and privacy-preserving for the research of edge computing. *Journal on Communications*, 2018, **39**(3): 1–21  
(张佳乐, 赵彦超, 陈兵, 胡峰, 朱琨. 边缘计算数据安全与隐私保护研究综述. 通信学报, 2018, **39**(3): 1–21)
  - 49 Song C, Zhang M, Zhan Y Y, Wang D S, Guan L Y, Liu W, et al. Hierarchical edge cloud enabling network slicing for 5G optical fronthaul. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, **11**(4): B60–B70
  - 50 Xu X L, Li D M, Dai Z H, Li S C, Chen X N. A heuristic off-loading method for deep learning edge services in 5G networks. *IEEE Access*, 2019, **7**: 67734–67744
  - 51 Maier M, Ebrahimzadeh A. Towards immersive tactile Internet experiences: low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, **11**(4): B10–B25
  - 52 Fu J S, Liu Y, Chao H C, Bhargava B K, Zhang Z J. Secure data storage and searching for industrial IoT by integrating fog computing and cloud computing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(10): 4519–4528
  - 53 Sharma S K, Wang X B. Live data analytics with collaborative edge and cloud processing in wireless IoT networks. *IEEE Access*, 2017, **5**: 4621–4635
  - 54 He Xiu-Li, Ren Zhi-Yuan, Shi Chen-Hua, Cong Li. A cloud and fog network architecture for medical big data and its distributed computing scheme. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, **50**(10): 71–77

- (何秀丽, 任智源, 史晨华, 丛犁. 面向医疗大数据的云雾网络及其分布式计算方案. 西安交通大学学报, 2016, **50**(10): 71–77)
- 55 Cheng N, Lyu F, Quan W, Zhou C H, He H L, Shi W S, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, **37**(5): 1117–1129
  - 56 Huang Z, Lin K J, Shih C S. Supporting edge intelligence in service-oriented smart IoT applications. In: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT). IEEE, 2016: 492–499
  - 57 Chien W C, Lai C F, Chao H C. Dynamic resource prediction and allocation in C-RAN with edge artificial intelligence. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(7): 4306–4314
  - 58 Jaradat M, Jarrah M, Bousselham A, Jararweh Y, Al-Ayyoub M. The internet of energy: smart sensor networks and big data management for smart grid. *Procedia Computer Science*, 2015, **56**: 592–597
  - 59 Botta A, De Donato W, Persico V, et al. Integration of cloud computing and internet of things: a survey. *Future generation computer systems*, 2016, **56**: 684–700
  - 60 Stergiou C, Psannis K E, Kim B G, et al. Secure integration of IoT and cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, 2018, **78**: 964–975
  - 61 Liu Si-Fang, Deng Chun-Yu, Zhang Guo-Bin, Qi Bing, Li Bin, Li De-Zhi, et al. Research on collaborative architecture for edge computing of residential intelligent usage of electricity. *Electric Power Construction*, 2018, **39**(11): 60–68  
(刘思放, 邓春宇, 张国宾, 祁兵, 李彬, 李德智, 等. 面向居民智能用电的边缘计算协同架构研究. 电力建设, 2018, **39**(11): 60–68)
  - 62 Liu Hui-Yuan, Xiao Fan, Zhang Zhe, Yin Xiang-Gen, Liu Wei. Short-circuit calculation method for unbalanced distribution network with integration of renewable energy. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, **43**(21): 177–186  
(刘慧媛, 肖繁, 张哲, 尹项根, 刘玮. 新能源电源接入不平衡配电网的短路计算方法. 电力系统自动化, 2019, **43**(21): 177–186)
  - 63 Fan Zhuo-Yi. Research on the Impact of New Energy Centralized Access on Power Network Protection and the Countermeasure [Master thesis], Huazhong University of Science and Technology, China, 2019  
(范卓艺. 新能源集中接入对电网保护影响分析及应对策略研究 [硕士学位论文], 华中科技大学, 中国, 2019)
  - 64 Lu Lu. Study on Influence of Large-scale New Energy Access to Ningdong Power Grid on Relay Protection [Master thesis], North China Electric Power University, China, 2018  
(鲁璐. 大规模新能源接入宁东电网对继电保护的影响研究 [硕士学位论文], 华北电力大学, 中国, 2018)
  - 65 Zhang Xu-Yang, Bai Yun. Transient stability of power electronic power system. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2019, (21): 213–214  
(张旭阳, 白云. 电力电子化电力系统暂态稳定性. 电子技术与软件工程, 2019, (21): 213–214)
  - 66 Hu Jia-Bing, Yuan Xiao-Ming, Cheng Sji-Jie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus. *Proceedings of the CSEE*, 2019, **39**(18): 5457–5467  
(胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题. 中国电机工程学报, 2019, **39**(18): 5457–5467)
  - 67 Tang Bin. Application of power electronics technology in power system. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019, (9): 226  
(唐斌. 电力电子技术在电力系统中的应用. 电子技术与软件工程, 2019, (9): 226)
  - 68 Zhang Mei-Qing. Study of Dynamic Interaction Analysis in Weak Sending-End Power System with High Proportion Power Electronics Apparatus [Ph. D. dissertation], Huazhong University of Science and Technology, China, 2018  
(张美清. 含高比例电力电子化装备的弱送端系统动态相互作用分析研究 [博士学位论文], 华中科技大学, 中国, 2018)
  - 69 Liu Chang. New Problems and Solutions of Relay Protection under the Situation of AC/DC Hybrid Power Grid [Master thesis], Huazhong University of Science and Technology, China, 2018  
(刘畅. 交直流混联电网场景下继电保护面临的新问题及对策 [硕士学位论文], 华中科技大学, 中国, 2018)
  - 70 Fan Xiao-Chun, He Hao. Key issues and countermeasures of relay protection in the smart grid. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2019, (15): 212–213  
(樊晓春, 何浩. 智能电网背景下继电保护的关键问题及对策. 电子技术与软件工程, 2019, (15): 212–213)
  - 71 Mei H B, Wang K Z, Yang K. Multi-layer cloud-RAN with cooperative resource allocations for low-latency computing and communication services. *IEEE Access*, 2017, **5**: 19023–19032
  - 72 Lin B, Zhu F N, Zhang J S, Chen J Q, Chen X, Xiong N N, et al. A time-driven data placement strategy for a scientific workflow combining edge computing and cloud computing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(7): 4254–4265
  - 73 Rimal B P, Van D P, Maier M. Mobile-edge computing versus centralized cloud computing over a converged FiWi access network. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2017, **14**(3): 498–513
  - 74 Hao F, Park D S, Kang J, Min G. 2L-MC.3: a two-layer multi-community-cloud/cloudlet social collaborative paradigm for mobile edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, **6**(3): 4764–4773
  - 75 Shi W, Cao J, Zhang Q, et al. Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, **3**(5): 637–646
  - 76 Xu En-Qing, Dong En-Ran. Analysis of nine application scenarios of cloud-edge collaboration. *Communications World*, 2019, (21): 42–43  
(徐恩庆, 董恩然. 探析云边协同的九大应用场景. 通信世界, 2019, (21): 42–43)
  - 77 Xu En-Qing, Dong En-Ran. Exploration and practice of coordinated development of cloud computing and edge computing. *Communications World*, 2019, (9): 46–47  
(徐恩庆, 董恩然. 云计算与边缘计算协同发展的探索与实践. 通信世界, 2019, (9): 46–47)
  - 78 Hua Xian-Sheng, Huang Jian-Qiang, Shen Xu, Fu Zhi-Hang, Zhao Yi-Ru, Huang Zhen, et al. Urban brain: cloud-edge based



- collaborative urban visual computing. *AI-View*, 2019, (5): 77–91  
(华先胜, 黄建强, 沈旭, 付志航, 赵一儒, 黄镇, 等. 城市大脑: 云边协同城市视觉计算. 人工智能, 2019, (5): 77–91)
- 79 Ren J J, Wang H C, Hou T T, Zheng S, Tang C S. Federated learning-based computation offloading optimization in edge computing-supported internet of things. *IEEE Access*, 2019, **7**: 69194–69201
  - 80 Yu Bo-Wen, Pu Ling-Jun, Xie Yu-Ting, Xu Jing-Dong, Zhang Jian-Zhong. Joint task off loading and base station association in mobile edge computing. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, **55**(3): 537–550  
(于博文, 蒲凌君, 谢玉婷, 徐敬东, 张建忠. 移动边缘计算任务卸载和基站关联协同决策问题研究. 计算机研究与发展, 2018, **55**(3): 537–550)
  - 81 Porambage P, Okwuibe J, Liyanage M, Ylianttila M, Taleb T. Survey on multi-access edge computing for internet of things realization. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, **20**(4): 2961–2991
  - 82 Long C C, Cao Y, Jiang T, Zhang Q. Edge computing framework for cooperative video processing in multimedia IoT systems. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2018, **20**(5): 1126–1139
  - 83 Qi Yan-Li, Zhou Yi-Qing, Liu Ling, Tian Lin, Shi Jing-Lin. MEC coordinated future 5G mobile wireless networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, **55**(3): 478–486  
(齐彦丽, 周一青, 刘玲, 田霖, 石晶林. 融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络. 计算机研究与发展, 2018, **55**(3): 478–486)
  - 84 Ren J, Guo Y D, Zhang D Y, Liu Q Q, Zhang Y X. Distributed and efficient object detection in edge computing: challenges and solutions. *IEEE Network*, 2018, **32**(6): 137–143
  - 85 Li L Z, Ota K, Dong M X. Deep learning for smart industry: efficient manufacture inspection system with fog computing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(10): 4665–4673
  - 86 Deng Xiao-Heng, Guan Pei-Yuan, Wan Zhi-Wen, Liu En-Lu, Luo Jie, Zhao Zhi-Hui, et al. Integrated trust based resource cooperation in edge computing. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, **55**(3): 449–477  
(邓晓衡, 关培源, 万志文, 刘恩陆, 罗杰, 赵智慧, 等. 基于综合信任的边缘计算资源协同研究. 计算机研究与发展, 2018, **55**(3): 449–477)
  - 87 Lin H, Chen Z H, Wang L S. Offloading for edge computing in low power wide area networks with energy harvesting. *IEEE Access*, 2019, **7**: 78919–78929
  - 88 Su X, Sperli G, Moscato V, Picariello A, Esposito C, Choi C. An edge intelligence empowered recommender system enabling cultural heritage applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **15**(7): 4266–4275
  - 89 Chen S L, Wen H, Wu J S, Lei W X, Hou W J, Liu W J, et al. Internet of things based smart grids supported by intelligent edge computing. *IEEE Access*, 2019, **7**: 74089–74102
  - 90 Zhang K, Zhu Y X, Leng S P, HE Y J, Maharjan S, Zhang Y. Deep learning empowered task offloading for mobile edge computing in urban informatics. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, **6**(5): 7635–7647
  - 91 Zhou Z, Chen X, Li E, Zeng L K, Luo K, Zhang J S. Edge intelligence: paving the last mile of artificial intelligence with edge computing. arXiv: 1905.10083, 2019
  - 92 Chen Wei, Chen Qing-Kui. Adaptive task assignment method for deep learning training. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2019, **40**(12): 2531–2537  
(陈伟, 陈庆奎. 面向深度学习训练任务的自适应任务分配方法. 小型微型计算机系统, 2019, **40**(12): 2531–2537)
  - 93 Wang X F, Han Y W, Leung V C M, Niyato D, Yan X Q, Chen X. Convergence of edge computing and deep learning: a comprehensive survey. arXiv: 1907.08349, 2019
  - 94 Tan Kun, Wang Xue, Du Pei-Jun. Research progress of the remote sensing classification combining deep learning and semi-supervised learning. *Journal of Image and Graphics*, 2019, **24**(11): 1823–1841  
(谭琨, 王雪, 杜培军. 结合深度学习和半监督学习的遥感影像分类进展. 中国图象图形学报, 2019, **24**(11): 1823–1841)
  - 95 Wang Feng, Wen Hong, Chen Song-Lin, Chen Liu-Fei, Hou Wen-Jing. Privacy data protection method for mobile intelligent terminal based on edge computing. *Information Security and Technology*, 2018, **9**(2): 47–50  
(王丰, 文红, 陈松林, 陈柳霏, 侯文静. 边缘计算下移动智能终端隐私数据的保护方法. 网络空间安全, 2018, **9**(2): 47–50)
  - 96 Meloni A, Pegoraro P A, Atzori L, et al. Cloud-based IoT solution for state estimation in smart grids: Exploiting virtualization and edge-intelligence technologies. *Computer Networks*, 2018, **130**: 156–165
  - 97 Konečný J, McMahan B, Yu F X, Richtárik P, Suresh A T, Bacon D. Federated learning: strategies for improving communication efficiency. arXiv: 1610.05492, 2016
  - 98 Tao X Y, Ota K, Dong M X, Qi H, Li K Q. Performance guaranteed computation offloading for mobile-edge cloud computing. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, **6**(6): 774–777
  - 99 Yuan J, Li X Y. A reliable and lightweight trust computing mechanism for IoT edge devices based on multi-source feedback information fusion. *IEEE Access*, 2018, **6**: 23626–23638
  - 100 Zhang C, Zhao H L, Deng S G. A density-based offloading strategy for IoT devices in edge computing systems. *IEEE Access*, 2018, **6**: 73520–73530
  - 101 Zhou Z, Chen X, Li E, et al. Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence with Edge Computing. arXiv preprint arXiv: 1905.10083, 2019.
  - 102 Rahman A, Rashid M, Hossain M S, Hassanain E, Alhamid M F, Guizani M. Blockchain and IoT-based cognitive edge framework for sharing economy services in a smart city. *IEEE Access*, 2019, **7**: 18611–18621
  - 103 Hao Y X, Chen M, Hu L, Hossain M S, Ghoneim A. Energy efficient task caching and offloading for mobile edge computing. *IEEE Access*, 2018, **6**: 11365–11373
  - 104 Wang C M, Liang C C, Yu F R, Chen Q B, Tang L. Computation offloading and resource allocation in wireless cellular networks with mobile edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, **16**(8): 4924–4938
  - 105 Yu S, Langar R, Fu X M, Wang L, Han Z. Computation offloading with data caching enhancement for mobile edge computing.

ing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, **67**(11): 11098–11112

- 106 Zhang Jiang-Feng, Wang Fei-Yue, Su Ye, Chen Bo, Wang Zi-Xiang, Sun Jian-Dong, et al. Power grid primary frequency control ability parallel computing based on multiple data. *Acta Automatica Sinica*[Online], available: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190512>, December 31, 2019  
(张江丰, 王飞跃, 苏烨, 陈波, 汪自翔, 孙坚栋, 等. 基于多源数据的电网一次调频能力平行计算研究. 自动化学报 [Online], available: <https://www.cnki.net/KCMS/detail/11.2109.TP.20191031.1702.004.html>, December 31, 2019)
- 107 Gao Ru-Wu. Digital Substation Relay Protection Technology. Hangzhou: Zhejiang People's Publishing House, 2012  
(高汝武. 数字化变电站继电保护技术. 杭州: 浙江人民出版社, 2012)



**白昱阳** 武汉大学电气与自动化学院硕士研究生. 2019 年获得武汉大学电气工程学院学士学位. 主要研究方向为边缘计算在电力系统运行和控制中的应用.

E-mail: baiyuyang@whu.edu.cn

(**BAI Yu-Yang** Master student of

the School of Electrical and Automation, Wuhan University. He received his bachelor degree from the School of Electrical Engineering, Wuhan University in 2019. His main research interest is the application of edge computing in power system operation and control.)



**黄彦浩** 中国电力科学研究院有限公司博士, 高级工程师. 主要研究方向为电力系统仿真分析.

E-mail: hyhao@epri.sgcc.com.cn

(**HUANG Yan-Hao** Ph.D., senior engineer at China Electric Power Research Institute. His main re-

search interest is power system simulation analysis.)



**陈思远** 武汉大学电气与自动化学院博士研究生. 2018 年获得武汉大学电气工程学院硕士学位. 主要研究方向为边缘计算在电力系统运行和控制中的应用.

E-mail: wddqcsy@whu.edu.cn

(**CHEN Si-Yuan** Ph.D. candidate

of the School of Electrical and Automation, Wuhan University. He received his master degree from the School of Electrical Engineering, Wuhan University in 2018. His main research interest is the application of edge computing in power system operation and control.)



**张 俊** 武汉大学电气与自动化学院教授. 2003 年和 2005 年分别获得华中科技大学电子信息与通信工程学士学位与硕士学位. 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. 本文通信作者.

E-mail: jun.zhang@qaii.ac.cn

(**ZHANG Jun** Professor at the School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University. 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. degree in electrical engineering from Arizona State University, USA, in 2008. His research interest covers intelligent systems, artificial intelligence, knowledge automation, and their applications in intelligent power and energy systems. Corresponding author of this paper.)



**李柏青** 中国电力科学研究院有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与运行控制技术.

E-mail: libq@epri.sgcc.com.cn

(**LI Bai-Qing** Professor-level senior engineer at China Electric Power Research Institute. His main re-

search interest is power system analysis and operation control technology.)



**王飞跃** 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长. 主要研究方向为平行系统的方法与应用, 社会计算, 平行智能以及知识自动化.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** State specially appointed expert and director of the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Professor of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. Director of China Economic and Social Security Research Center in University of Chinese Academy of Sciences. Dean of Qingdao Academy of Intelligent Industries. His research interest covers methods and applications for parallel systems, social computing, parallel intelligence, and knowledge automation.)