第 50 卷 第 8 期：3324-3338　　高电压技术　　Vol.50, No.8: 3324-3338
2024 年 8 月 31 日　　High Voltage Engineering　　August 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240676

新型电力系统专用传感与边缘智能关键技术及其展望

余　涛，梁敏航，罗庆全，蓝超凡，王艺澎，潘振宁
（华南理工大学电力学院，广州 510641）

摘　要：电力物联网在电力系统的实时传感、透明感知与全局调控中发挥着重要作用。随着新型电力系统的不断演化，传统的设备传感与静态独立的智能系统难以应对多样化业务需求激增、多元化数据爆发式增长、传感器通信可靠性差与能效低下和算法模型迭代成本高等难题。因此，高度多元集成、绿色持续可靠、云边端深度协同的新型电力系统专用传感与边缘智能有望成为新范式。该文首先以新型电力系统专用传感与边缘智能的基本内涵为基础，构建了专用传感与边缘智能融合贯通的体系架构。然后重点阐述了国产化高频新型传感技术、绿色供能的高性能嵌入式芯片技术、高可靠性灵活组网技术、轻量化模型推理技术、云边协同资源共享技术和在线学习持续迭代技术。并进一步展望了专用传感与边缘智能在数据治理、隐私保护、软件定义硬件、业务-算力微服务、多层分布式泛在智能和电力大模型等发展方向，以期为新型电力系统建设提供参考。
关键词：新型电力系统；电力物联网；专用传感；边缘智能；云边协同

Key Technologies and Perspectives of Specialized Sensing and Edge Intelligence for New Power Systems

YU Tao, LIANG Minhang, LUO Qingquan, LAN Chaofan, WANG Yipeng, PAN Zhenning
(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The internet of things plays a significant role in real-time sensing, transparent perception and global regulation of power systems. With the continuous development of new power systems, the traditional device sensing and static independent intelligent systems are difficult to cope with problems such as the proliferation of varied business requirements, explosive growth of diversified data, poor communication reliability and low energy efficiency of sensors, and high cost of iteration algorithmic modelling. Therefore, it is anticipated that the new power systems, which is characterized by its specialized sensing and edge intelligence, will become the new paradigm, and the system is highly multifaceted and integrated, environmentally friendly and continuously reliable, with deep cloud-edge-end synergy. We constructed the system architecture of fusion and coherence of specialized sensing and edge intelligence on the basis of the fundamental connotation of these two elements in a new power system. Then, we emphatically discussed the key technologies, such as localized high-frequency new sensing technology, high-performance embedded chip technology with green energy supply, high-reliability flexible networking technology, lightweight model inference technology, cloud-edge collaborative resource sharing technology, and online learning continuous iteration technology. Finally, to provide a reference for the construction of new power systems, we put forward the future development directions of specialized sensing and edge intelligence in terms of data governance, privacy protection, software-defined hardware, business arithmetic microservices, multi-layer distributed ubiquitous intelligence, and power grand modelling.
Key words: new power systems; internet of things; specialized sensing; edge intelligence; cloud-edge collaboration

基金资助项目：南方电网重点科技项目 (066600KK52222023)；国家自然科学基金 (52207105)；中国博士后科学基金 (2022M721184)；广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目 (SL2022A04J01135)；广东省基础与应用基础研究基金 (2023A1515011598)。
Project supported by Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation (066600KK52222023), National Natural Science Foundation of China (52207105), China Postdoctoral Science Foundation (2022M721184), Guangzhou Basic and Applied Basic Research Foundation (SL2022A04J01135), Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515011598).

0　引言

习近平总书记在 2023 年中央深改委第二次会议上强调，要加快构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统[1]，其核心特征在于高比例新能源与电力电子设备接入。新型电力系统是实现双碳目标的重要组成部分[2]。其对系统各部分转型升级提出了新的技术要求：在电源侧，风能、太阳能等清洁能源装机容量占比超过 50%[3]，带来了局部电力供应趋于不稳定的挑战，电网调度更加依赖海量实时数据；在负荷侧，分布式电源、新能源汽车、储能等灵活性资源大范围分散接入，负荷随机性、灵活性的增加对电网可靠性的要求剧增，亟需电网负荷大数据精细化管理；在电网侧，供给双向互动、能源需求响应、电力现货市场等新要素出现，电网潮流从单向变双向，源网荷储全环节协同控制困难，能源调度与储能管理难题成为瓶颈。因此，如何在高波动、高随机性的复杂电网中实现实时传感、透明感知与全局调控，成为当前新型电力系统面临的核心挑战之一。

电力物联网为解决上述困难提供了一种解决方案。电力物联网将电网、物网和互联网深度融合，通过广泛部署智能传感器感知数字化设备电参数与状态量，内置算力资源允许其完成数据预处理与推理业务，实现用户、设备、电网全域透明感知[4-5]。由于数据在靠近源处进行操算，无需上传至云端，因此节省了大量的传输延迟与能耗，提升了电源受限的智能传感器使用年限。然而，新型电力系统仍面临以下问题：

1）随着数字化设备在发输变配用各环节推广应用[6]，传感数据量快速增长。据统计，每 100 万台智能电表每年能产生数据 1460 TB，仅我国智能电表每年传感数据量增加约 120 PB[7]。然而边缘终端的算力有限，远不及日常生活手机、电脑等设备的算力[8-10]，无法有效处理大规模的高级推理任务，加剧了对云计算资源的需求。

2）随着新型电力系统发展，通用的计算模型无法适应所有场景，如在环境变化导致电-气互联系统可靠性改变[11]、输电线路异常特征变化[12]、虚拟电厂新增二次调频业务[13]与新电器非侵入式负荷监测[14]等场景，参数统一的计算模型难以避免效果严重下降。同时，电网存在高波动和高噪声的干扰。这些因素均迫使边缘终端上部署的算法模型需要快速微调，以适配给定的应用场景。

3）固有传感器器件落后，慢速低效的通信与云服务器海量吞吐矛盾[15]。传统的电源供给方式严重依赖人力物力，与低碳绿色不匹配，故亟需结合电力物联网的新型传感器在通信与能耗上优化。

综上，传统的设备传感与静态的人工智能和不断动态演化的新型电力系统严重不匹配，新型电力系统安全可靠稳定运行得不到保证，迫切需要适用于新型电力系统的专用传感与边缘智能，以适应新型电力系统的新特征。一方面，新型电力系统专用传感如“生物神经元”，能够满足新型电力系统对不同类型设备的充分感知与实时处理需求，具备多元设备数据采集能力的“神经末梢”和配备集成算力与存储的“细胞核”。其在材料先进、自主研发的基础上，将传统单一传感拓展至时间、空间、多元三维同步传感，具有高度集成、可靠持续、绿色清洁等特征。另一方面，新型电力系统边缘智能将计算、通信、存储资源从云或边缘下沉至边缘终端，成为电力物联网的新范式。其充分利用终端应用层、边缘层与云服务层的层次结构，联合云边端资源与人工智能，以实现数字化设备边缘终端部署的计算模型更新迭代与协同计算，从而缓解计算、通信、存储链路拥堵与故障带来的问题。专用传感作为边缘终端，与作为资源利用手段的边缘智能深度融合，必将推动新型电力系统发展，实现设备传感与人工智能和新型电力系统协同发展。

目前，新型电力系统专用传感与边缘智能已有初步尝试：多参数融合的传感单元边缘计算模块已应用于数字化设备状态监测[16-17]；通过计算资源下沉以释放计算、存储、通信压力的边缘智能方法已在变电侧、配电侧部署应用[18-20]，但尚未形成完整的应用体系架构。本文尝试对新型电力系统专用传感与边缘智能进行系统性梳理与总结。第 1 章阐述新型电力系统专用传感与边缘智能的基本内涵；第 2 章总结并提出新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构；第 3 章从感知层、核心层、通信层 3 个方面分别阐述新型电力系统专用传感关键技术；第 4 章从边缘终端层、边缘层、云服务层 3 个层面描述新型电力系统边缘智能关键技术；进一步，第 5 章综合新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构与关键技术，提出关键挑战与展望未来，以期为新型电力系统建设与发展提供参考。

1 新型电力系统专用传感与边缘智能基本内涵

本章总结与新型电力系统专用传感与边缘智能发展的相关文献，挖掘新型电力系统对比传统电力系统在专用传感与边缘智能的新特性、新态势、新发展，在相关定义的基础上，解释新型电力系统专用传感与边缘智能的基本内涵。

1.1 新型电力系统专用传感

传感器普遍由传感模块、处理模块与通信模块组成[21-24]。在此基础上，新型电力系统专用传感应适应新型电力系统新特征：在材料与工艺上要求适应数字化设备老化、气候环境条件劣化、电磁干扰与机械振动等条件变化，减少传感误差过大、机械受损等故障；在传感上要求适应多元感知，温度、声音、振动、气体、红外图像等状态量对设备分析、状态估计起重要支撑作用，同时要求适应高频与超高频感知，以有效甄别故障电弧[25]、监测局部放电[26]等暂态异常；在物联网上要求适应复杂环境的通信链路，减少数据多级传递，加快数据直连，同时要求适应本地推理，提高算力以均衡云边端计算负载，满足计算业务需求。

因此，与传统传感器相比，新型电力系统专用传感在材料与工艺、多元感知和物联网等方面提出更高的要求。目前已有相关研究进展：在新材料与新工艺方面，硅凹槽膜片型光纤法布里-珀罗超声传感器[27]、半导体气体传感器[28]、Zehnder 与 Sagnac 复合干涉结构光纤传感器[29]等新型传感器不断涌现探索多参量融合传感；在多元感知方面，振动-加速度-超声波融合传感器[16]、融合溶解气体-特高频-光纤超声多参数的融合传感阵列[17]、特高频传感器[30]持续发展，实现多元传感的同时满足高频采集的需求；在适配物联网上，集信号采集-数据分析-信息传输功能于一体的传感终端推广应用[31-33]，基于射频识别[34]、分级广播[35]、5G 移动[36]的多元通信传感并存发展。无需电源即可运行的光纤磁场传感器得以成功研制[37]。新型电力系统专用传感紧跟物联网计算、通信、存储发展，为边缘智能与专用传感充分融合和协同发展提供硬件与软件基础。

纵观电力系统传感节点发展，新型电力系统专用传感是电力、材料、物联网等学科交叉的产物，需要多学科融合促进新型电力系统专用传感迈向智能化、小型化、高集成、可持续。图 1 是对新型电力系统专用传感的基本内涵示意图。

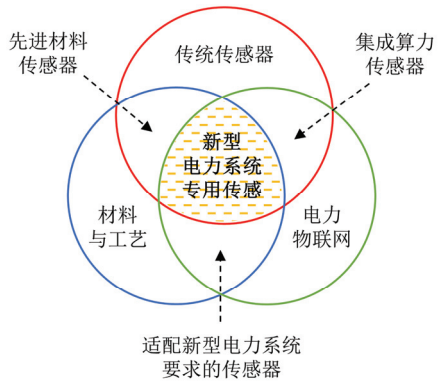


图 1 新型电力系统专用传感基本内涵

Fig.1 Basic connotations of new type of power system-specific sensing

1.2 新型电力系统边缘智能

边缘智能概念最早源于阿卡迈公司提出用于降低网络拥堵的内容分布网络(content distribution network，CDN)。自该概念出现以来，不少学者开展了边缘计算与边缘智能相关研究。有研究将其定义为计算、通信、存储资源从云侧下沉到边缘终端侧[38-41]。随着人工智能与边缘终端的发展，盲目下沉资源已不是边缘智能的最优解，在云边端系统中实现计算加速、资源分配与在线学习，以充分发挥边缘终端、边缘层、云服务层的协同作用，受到广泛关注[42]。尽管目前对边缘智能没有统一的定义，但目前边缘智能已发展到新的阶段：边缘智能由终端应用层、边缘层和云服务器层等物理实体组成，数据流、通信流贯穿其中，计算、通信、存储资源在 3 者之间协同分配，在靠近数据源处完成计算任务，实现资源、能源、服务质量在边缘智能全周期的可持续均衡。

新型电力系统边缘智能继承了边缘计算的概念，在新型电力系统监控响应、故障诊断、能源管理、信息安全保护等方面应用广泛。在电源侧，有研究基于边缘终端进行新能源优化配置，如文献[43]协同控制有载调压分接头、电容器组和光伏逆变器，实现兼顾配电网电压安全和光伏最大消纳的实时置信无功优化。在负荷侧，研制新型负荷侧管理的智能边缘终端成为趋势，如文献[44]利用边缘智能设计具备数据交互与智能处理的多元负荷管理模块，减轻多信息接入下终端通信速度与数据处理的压力；在电网侧，研究多关注边缘智能在电力视觉的应用[45]，如文献[46]设计具备边缘计算的输电线路

智能监测系统，有效识别输电线路故障和安全隐患；文献[47]基于贡献度感知模型通道剪枝策略，轻量化输电线路异常目标检测模型；文献[48]针对传统运行调控技术方法难点，提出面向城市能源系统边缘智能理念及其体系架构。

从上述研究可见，运用边缘智能技术，对新型电力系统规划、运行、调控产生极大推动力。在上述研究的基础上，对面向新型电力系统的边缘智能内涵进行重新归纳。如图 2 所示，面向新型电力系统的边缘智能，通过协同利用与调配区域间边缘计算、通信、存储资源，解决各环节资源不均衡、计算模型通用性差等技术难题，促进新型电力系统可持续发展。

2　新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构

基于新型电力系统专用传感与边缘智能基本内涵，不难发现专用传感为边缘智能提供硬件基础，边缘智能为专用传感提供更新迭代的算法模型支撑，以及数据流、信息流的双向流动。因此，充分考虑专用传感与边缘智能体系融合，对现有关于新型电力系统专用传感与边缘智能发展进行总结，凝练出新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构。新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构包含专用传感与边缘智能两部分，专用传感包含感知层、核心层和通信层等结构，边缘智能包含终端应用层、边缘层和云服务层等结构，两者通过数据流、信息流衔接，具体架构如图 3 所示。

专用传感包含以下结构：

1）感知层。包含部署于数字化设备的多种专用传感器。感知层直接对数字化设备进行状态感知，是沟通数字化设备和专用传感的重要桥梁，也是专用传感的“神经末梢”。感知层通过专用传感器，获取数字化设备的电、声、光、热、振动、图像等参量，并转化为可识别信号到核心层中。

2）核心层。负责对感知到的模拟信号进行滚动存储与计算处理，是专用传感的“神经元”。核心层主要包含处理数据的计算单元和滚动存储的存储单元。从边缘层下放的资源允许专用传感完成数据本地处理，无需通过数据链路上传到边缘层或云服务层。

3）通信层。负责将专用传感数据处理的结果上传至边缘智能中，是链接边缘智能与专用传感的

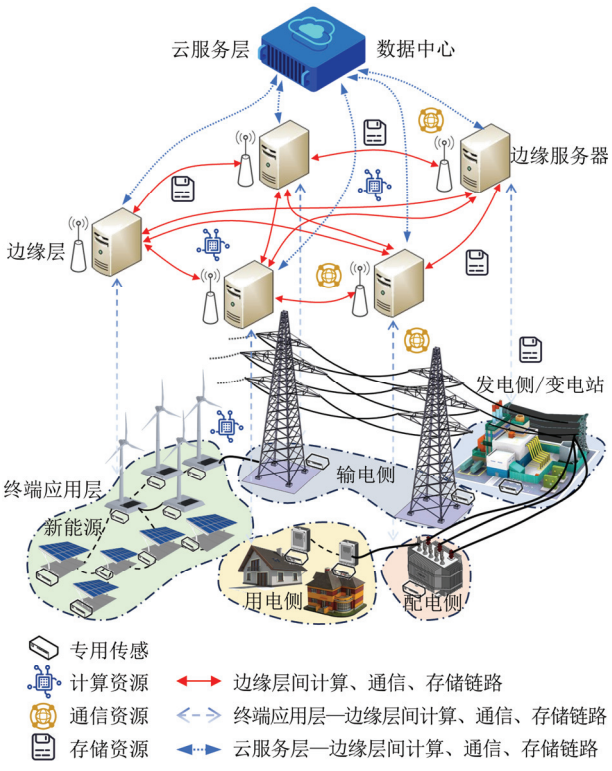


图 2　新型电力系统边缘智能基本内涵

Fig.2　Basic connotations of new type of power system edge intelligence

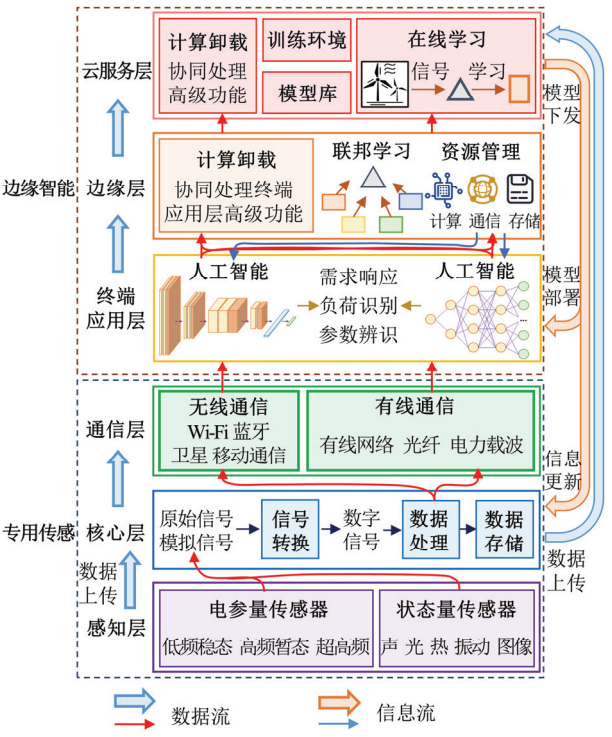


图 3　新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构

Fig.3　New type of power system-specific sensing and edge intelligence architecture

重要中枢。通信层与边缘智能可进行有线或无线通信。为加快边缘智能与专用传感的通信进程，高度集成的专用传感核心层通常和边缘智能的终端应用层通过高速总线连接。

边缘智能包含以下结构：

1）终端应用层。与专用传感只对数据进行处理不同，边缘智能的终端应用层集成单个或多个传感器的数据信息，通过人工智能、数学优化等方法，在有限计算资源下进行需求响应、负荷识别、负荷预测等高级应用。终端应用层将处理结果反馈至专用传感核心层或边缘智能云服务层，实现“透明感知-数据处理-数据应用”的闭环控制。

2）边缘层。边缘层的计算、通信、存储资源量介于终端应用层与云服务层之间，与固定范围内的终端应用层通信，收集数字化设备的状态信息，作为数据接收端并转发至云服务层。边缘层可进行联邦学习、在线学习等高级应用。当终端应用层无法完成高级应用任务时可以迁移至边缘层进行处理。

3）云服务层。负责收集与管理区域内数字化设备的状态信息，同时具备强大的计算、通信、存储资源，配备训练环境、数据中心与模型库，满足人工智能在线学习与持续学习基本需求。当终端应用层或边缘层因资源限制无法完成高级应用任务时，可以卸载至云服务层中进行处理。

新型电力系统专用传感对单一数字化设备管理，完成数据采集、处理、存储，数据流通过感知层、核心层、通信层逐步向边缘智能传输；边缘智能统筹管理区域内所有数字化设备，完成设备协同调控的同时，基于流式数据持续更新计算模型。纵观体系架构，专用传感向边缘智能提供数据支撑，边缘智能向专用传感建立算力网络，两者相辅相成。

3 新型电力系统专用传感关键技术

随着新型电力系统数字化设备多样化与量测多元化，传感功能单一的传感器已不再满足边缘智能与复杂环境的需求，亟需在感知层、核心层和通信层取得新的技术突破。本章围绕 3 个层级，讨论现有专用传感关键技术及其在新型电力系统数字化设备中发挥的关键作用。

3.1 感知层——国产化高频新型传感技术

新型电力系统专用传感的感知层与数字化设备直接接触，由多种专用传感器组成。随着数字化设备多样化、运行工况复杂化，感知层面临着以下问题：(1) 新型电力系统装配大量电力电子型设备，低频低精度的感知层无法捕捉其产生的暂态信号；(2) 数字化设备增量传感较多，感知层集成度低，占据大量空间与通信资源，仍处于单参数单模态阶段；(3) 国产化程度低，严重依赖国外进口传感器。因此，新型电力系统专用传感的感知层应朝着可靠精准、多模多态、全面国产的方向发展。首先，需提高专用传感感知层的采样频率与采样精度，开发多级缓存流式读取数据方法。其次，研发集成多种感知参数并有效处理技术，提高感知层集成度与整体效率。最后，加大国内自主制造传感器研发投入，从而提高专用传感感知层的可控性与可持续性。国产化高频新型传感技术是助力新型电力系统专用传感的关键技术，其包括高频精准与先进材料国产化 2 个方面，通过提升高频信号的精准检测与性质特征，适应新型电力系统复杂严苛环境。

智能电表是新型电力系统用电侧感知层高频精准应用的典型代表。新一代智能电表以千赫兹级高频和 0.2%高精度传感器作为感知层单元，正在快速发展。据统计，全国智能电表保有量已超过 6.5 亿台，全国年均智能电表更换量约 8000 万台[7]。随着智能电表大规模取代传统电表，用电侧感知层的升级极大地改变了公用事业及消费者与电力能源的互动方式。高频高精度传感器作为智能电表的感知层核心单元，提高电参数测量准确性的同时，为内置核心层自动生成用电用户画像，减少人工抄表与校正干预等操作提供数据基础，提高了感知层的可靠性、精确性与稳定性。得益于智能电表，消费者能对能源消耗透明感知，生产者与决策者能更精确地分析用户使用模式并预测未来能耗需求，提供更个性化的服务和提升业务服务质量。此外，高频的电参数赋予边缘终端分析用户用电暂态行为的能力，结合人工智能技术，有助于挖掘用户危险用电行为与潜在用电安全风险。

先进材料国产化促进新型电力系统专用传感呈现新的特征，实现量变无法逾越的质变。微机电系统(micro-electro-mechanical system，MEMS)技术推动了磁阻、压电、光电和磁光等先进元器件的涌现[49]。微纳体积、高精度、高信噪比、宽频带和超低功耗等特点为新一代电力微型智能传感器的发展创造了革命性的技术路径。国网智能电网研究院有限公司在变压器油溶气体分离装置[50]、隧穿磁阻磁敏电流传感器[51]、以及基于非接触式传感技术的架

空输电线路动态增容系统[52]等方面取得了突破性进展。南方电网数字集团技术研发中心智能传感团队将 MEMS 传感器引入电力量测领域，成功研制出“极目”智能电流、电压、电气量集成传感器等系列产品，实现核心 MEMS 传感元件完全国产化[53]。国家电网安徽省公司联合研制新一代量子电流互感器，全球首次成功将量子精密测量技术以及量子精密测量装备安装在电力生产场景，为量子精密测量技术产业化提供样板，引导电力计量发展新方向与新趋势[54]。

3.2　核心层——绿色供能的高性能嵌入式芯片技术

核心层在新型电力系统专用传感中扮演承前启后的重要作用，需要快速完成感知层的数据预处理与存储，并将处理后的数据经过通信层向边缘智能传输。然而，数据量激增对专用传感核心层提出更高的处理效率要求，过低的处理效率成为数据流的瓶颈。同时，专用传感核心层需要提供电源，过高的能耗与不稳定供电成为专用传感的短板，而过度投入人力物力以持续维护专用传感的电源供给是不可靠、不清洁的。因此，新型电力系统专用传感的核心层未来应是高性能与绿色清洁的。一方面，基于数据挖掘算法对专用传感感知层数据进行处理的需要，使得高性能的处理能力成为专用传感核心层的刚需；另一方面，可持续绿色供电的专用传感能从根源上解决能耗问题，更加符合新型电力系统的发展趋势。绿色供能的高性能嵌入式芯片技术作为核心层关键技术，其包含算力强化与绿色供能两个方面，通过不断提升计算能力与节能环保的电源供给，助力专用传感核心层可持续发展。

高性能嵌入式芯片持续发展，算力得到进一步提升，逐渐超越摩尔定律。近年来，以嵌入式芯片为代表的核心层为新型电力系统专用传感提供更强大的支撑。2007 年，业界首款搭载 ARM Cortex-M3 系列内核的 32 位 MCU 意法半导体 STM32F1 系列亮相，物联网进入人们的视野。随后嵌入式领域对于高性能处理器的需求呈现爆发式增长，兼顾电力物联网低功耗和高性能要求。2019 年意法半导体 STM32MP1 系列发布，具备多核处理器同时支持 Linux 操作系统，满足工业 4.0、智慧城市与智慧家居的需求，为智能电网数字化设备协同发展和高性能云边端协同计算提供硬件支撑。随着嵌入式芯片自主研发能力的提升，面向新型电力系统的国产化电力专用芯片迸发生机。2021 年我国自主可控的第 1 款电力专用主控芯片“伏羲”研发成功，目前已在变电、配电、计量、新能源、电力物联网等领域验证并规模化应用[55-56]。2023 年底，清华大学提出光电模拟芯片，算力达到目前高性能商用芯片 3000 余倍，为未来电力专用芯片注入活力[57]。

高性能嵌入式芯片对核心层的电源质量要求激增，频繁更换一次性电源造成浪费，绿色低碳技术为上述问题提供解决方案。以光伏为代表的电源供应为核心层提供新的思路。光储充一体化充电站充分利用大棚顶部空间安装光伏板，为专用传感的电源供应提供新的思路[58]。国网新疆电力有限公司积极开展新技术攻关，利用压电效应与电磁机电转换原理设计出一种可在风速低至 2.5 m/s 条件下均能产生共振的能量收集与转换单元，实现传感器自供电，有效支撑电厂风电功率预测及输电线路周边气象监测[59]。在低碳零碳的发展道路上，核心层绿色供能将愈发重要。

3.3　通信层——高可靠性灵活组网技术

通信层是新型电力系统专用传感与边缘智能联络的重要桥梁。专用传感通过通信层上送数据，边缘智能通过通信层下送信息。同时，通信层是新型电力系统专用传感组网的重要介质，不同传感单元可通过通信层直连，减轻核心层与边缘层和云服务层的通信负担。然而，专用传感的通信层仍面临以下问题：(1) 数据流与信息流贯穿新型电力系统，通信安全是首要考虑的问题，保护通信数据完整性与隐私、防止恶意攻击和数据泄露至关重要；(2) 专用传感通信层的网络拓扑设计时系统容错性差，星型通信网络系统在服务器出现故障时直接崩溃，系统可靠性差。因此，通信层首要攻破通信安全问题，在专用传感层面应用多种加密算法与安全协议，确保通信数据保密性和完整性；同时，挖掘更可靠和高效的组网方式，如网状通信网络，提高通信稳定性。由此可见，可靠组网是新型电力系统专用传感通信层的首要目标。高可靠性灵活组网技术通过拓展单种通信方式的组网方案，以及增加多种新兴通信种类，提高通信的灵活性与可靠性。

近年来，单种通信方式在新型电力系统中的应用得到拓展。以电力载波为例，其利用电力线通过载波将模拟或数字信号进行高速传输，在智能电表远程抄表[60]、路灯远程监控[61]发挥重要作用。有研究将电力载波应用到新型电力系统用电侧设备组网。通过在用电侧负荷组成的微网拓扑内施加高频

电力载波，实现多元数据集成与管理，为专用传感通信层，尤其是单一区域内多个数字化设备专用传感集中通信管理提供新的发展思路[62]。同一区域内，新型电力系统数字化设备通常通过电力线连接，相互之间存在物理连接关系。通过对区域内微网拓扑施加高频电力载波，隔离外网高频信号干扰与防止微网向外网注入高频信号，充分发挥现有连接关系即可实现低成本、高可靠的传感组网。

随着现有通信方式朝着多元种类方向发展，蓝牙、Wi-Fi、移动通信等无线方式和有线网络、光纤、电力载波等有线方式在新型电力系统得到应用[63]，进一步提高了专用传感通信层的灵活性与可靠性。最新研究考虑卫星互联网，在新型电力系统规划建设、态势感知、巡视检修、防灾应急等方面得到综合应用[64]。未来的专用传感通信层将完全实现无感组网，助力专用传感与边缘智能通信发展。

4 新型电力系统边缘智能关键技术

随着感知数据剧增，为了解决随之而来的计算能力不匹配、传输带宽负载重、边缘终端能耗危机等问题，早期研究者提出边缘计算，将算力要求弱、数据密集型任务卸载至边缘侧甚至终端应用侧执行。根据工信部数据，2022 年我国基础设施算力规模达到 180 EFlops(每秒百亿亿次浮点运算次数)，预计到 2025 年，我国算力规模将超过 300 Eflops[65]。3 年内算力规模快速提升，标志着算力愈加丰富，赋予边缘终端更强的计算能力，在终端应用层、边缘层、云服务层涌现多种新范式。本章围绕新型电力系统边缘智能 3 层结构展开讨论。

4.1 终端应用层——轻量化模型推理技术

新型电力系统边缘智能的终端应用层部署多种人工智能算法模型以完成业务。在电源侧，变压器、发电机等发电设备需时刻关注温湿度、油质量和绝缘状态，其重要手段是状态监测与图像识别，是数字化设备安全运行的重要保障；在负荷侧，用户电表、新能源充电桩等设备搭载负荷特性或负荷识别模型，有助于电网精细化管理负荷大数据；在电网侧，变电巡检搭载红外图像实时识别模型，输电线路搭载多元传感辨识模型，是保证电网安全稳定运行的重要根基。随着环境复杂化与人工智能应用需求增加，人工智能算法模型的规模增大。

然而，边缘终端受物理空间限制，相较于云端仍面临内存少、算力弱、电池小的挑战，迫使终端应用层搭载更轻便的人工智能算法模型。因此，轻量化模型推理技术成为边缘智能终端应用层关注的焦点，其通过模型剪枝、模型压缩等方法，在尽量保持原始计算模型精度的前提下，极大减少新型电力系统业务的计算模型计算量和内存需求，从而减少边缘智能能耗与计算压力。彩票假设表明，计算模型通常过参数化，存在大量无关参数，给轻量化模型推理有效性提供理论支撑。

传统的模型剪枝方法在损失函数中加入待剪枝参数的范数，从而在模型训练时关注到参数的绝对值大小。然而，由于剪枝后大量的零参数判断和冗余空间无法释放，传统的模型剪枝并不能真正使计算轻量。学者们开始关注核剪枝、层剪枝、通道剪枝等结构化剪枝方法，最新的研究提出半结构化剪枝[66]和针对残差结构的残差网络剪枝[67]。与此同时，人工智能快速发展，多种衡量贡献度的方法如信息熵、遗传算法、注意力机制等在模型剪枝得到广泛应用[67-68]。

模型压缩尝试将结构复杂、参数庞大的原始计算模型变为结构简单、参数量少的计算模型。根据压缩手段不同，可分为知识蒸馏、结构合并、拓扑变化。知识蒸馏设置教师网络与学生网络，将教师网络的知识迁移至学生网络中实现压缩；结构合并在模型训练时尝试将计算结构合并在一起；拓扑变化则在原始计算模型上设置多种前向支路或出口，压缩模型推理路径，典型代表包括 Branchy-Net[69]、Blockdrop[70]、SkipNet[71]等。近年来，也有学者提出混合模型剪枝与模型压缩的方法，文献[72]利用贝叶斯推理计算每个卷积核的重要性，应用张量分解进行模型压缩。

搭载负荷识别模型的智能终端是典型的专用传感与终端应用深度融合应用案例，其通过整合计算、通信、传感于智能终端中，直接完成从数据感知、数据处理到负荷监测、用户反馈，尤其在电气消防火灾、安全用电等领域备受关注。其中典型代表是电力指纹终端[73]，其通过事件检测及信号分解还原等手段，从复杂的用电数据中精准感知目标用电设备的关键信息，利用数学变换与特征标准化技术提取设备中类比于生物指纹的特征，利用人工智能实现对用电设备类型、参数、状态、行为等深度认知。图 4 为电力指纹插座终端与断路器终端。电力指纹终端聚焦挖掘电信号中隐含的数据信息，在终端应用层完成用户负荷监测，当检测到危险用电



图 4　电力指纹插座终端与电力指纹断路器终端

Fig.4　Electric power fingerprint socket terminal and electric power fingerprint circuit breaker terminal

行为，如电动车电池在室内充电、学生宿舍违规使用大功率电器时，自动切断电源，保护用户用电安全[8-10]。

新型电力系统边缘智能终端应用层中应用轻量化模型推理技术，有助于在专用传感与边缘终端部署本地决策任务，轻量化后的模型可直接部署在计算、通信、存储资源紧张的边缘终端中，满足基于图像、多维数据等信息的红外摄像头监控、输电线路智能感知终端和无人机巡线或机器人巡检等场景的应用需求，感知数据无需上传至云服务器或人工介入，即可直接实现评估数字化设备状态、输电线路覆冰综合告警、无人机巡线实时评判等，极大缓解边缘层或云服务层计算压力与通讯堵塞问题。

4.2　边缘层——云边协同资源均衡技术

新型电力系统业务多、计算繁杂，边缘智能的边缘层聚焦通过云边协同实现与终端应用层的双向互动和协同推理，提高数据处理效率、降低延迟和网络负担，增强数据安全性。新型电力系统边缘智能的边缘层广泛活跃在电力系统广域智能发电控制、变电站站域仿真分析与控制保护、负荷建模及调节能力评估等领域。以负荷建模为例，负荷数据由专用传感感知层上行传至终端应用层后，协同训练获得精准的负荷模型，多种低压等级负荷模型参数上送至边缘层聚合获得高压等级负荷模型。同时，在负荷实际运行中对模型参数微调，通过云边协同完成所有模型修正更新，为电网实时调度与运行决策提供更精确的负荷特性模型[39]。

随着云边协同发展，近年来学者更关注资源在边缘系统的均衡利用。云边协同资源均衡技术有效协调系统内计算、通信、存储资源，基于图论[66]、凸优化、匹配理论、排队理论等方法[74]实现资源共享，是边缘层的关键技术。强化学习、表示学习、混合整数规划等方法成为重要工具。其中，强化学习对云边协同问题背景建立学习环境，智能体从中探索获得奖励或惩罚，从而促进智能体学习更优的策略。现有文献基于深度 Q 网络[75-78]、深度确定性策略梯度[79-81]、双延迟深度确定性策略梯度[82]等强化学习方法实现。表示学习[83-84]生成能够挖掘云边协同环境的数据特征或潜在结构的模型，从而发现数据的有用表示。与上述基于机器学习的方法不同，有学者将云边协同问题归纳为混合整数规划问题，由于存在大量离散决策变量，直接求解混合整数规划问题通常非常困难，需通过李雅普诺夫优化[85]、强盗学习[86]、问题分解[74]等方法，获取问题的最优解或近似最优解。

新型电力系统中数字化设备配备海量专用传感为云边协同提供硬件支撑，广泛应用专用传感与边缘终端的计算、通信、存储资源，有效缓解大规模分布式任务对单一计算单元的压力。目前在光伏场与配电网业务管理已有初步尝试。光伏场部署海量光伏发电板与光伏逆变器，集成海量数据与控制的边缘服务器将控制模型与资源下放至边缘终端处，减少对边缘终端的集群控制[43]。配电网中同样存在多种多样的边缘终端，与传统边缘服务器集成数据与业务不同，智能配电网边缘终端具备处理业务的能力与资源，故边缘服务器只需处理少量业务即可，减轻边缘服务器计算与存储负担。

4.3　云服务层——在线学习持续迭代技术

随着新型电力系统的更新迭代发展，新型数字化设备与专用传感的不断更新换代。且源网荷等数据具有时变性，运行工况随季节、天气、用电行为的变化而改变，各种新型电力系统业务的人工智能算法模型需不断更新，以保持系统预测与优化的准确性。传统的离线更新方法为电力系统数据中心通过专用传感设备人工采集新的数据集，在具备最丰富资源的云端上使用相同模型或新的模型进行训练与测试，并将模型通过离线方式部署到专用传感或边缘终端中。然而，数据量指数增长与海量数字化设备对离线更新提出了较高的人力物力时间需求。近年来，为减少模型更新的冗余成本，在线学习持续迭代技术为专用传感与边缘智能搭载的人工智能算法模型更新迭代提供活力，实现高效自动化的模型更新与优化，是云服务层的关键技术。

在线学习是指利用边缘智能在线收集专用传感上送的数据与模型，在线进行模型更新，以学习

新的传感特征分布，获取更佳精度的方法。一方面，考虑在弱算力平台学习，出现云边协同学习[87]、稀疏模型学习[88]、增量学习[89]等新范式，通过整合云与边的资源与尽可能减少终端训练的复杂度，便于在资源有限的边缘终端完成样本学习，这些新范式在 Nvidia Jetson 等高性能 AI 嵌入式系统中验证。也有学者关注在集成的模型库中筛选模型的学习方法[90]，以匹配最合适的模型。

新型电力系统中在线学习的需求更多体现在用电侧。一方面，随着电动汽车的普及，智能电动汽车充电桩广泛分布于街头小巷，基于电动汽车的电网需求响应行为增加，智能充电桩需实时更新内置参数辨识模型，以提高电动汽车电池参数辨识精度，实现更精确、更节能、更经济的互动策略。另一方面，面向电动自行车电池室内充电等危险用电行为的智能电表、智能插座广泛部署，通常搭载同一套算法模型，但不同电动自行车的充电规律各不相同，智能终端需要通过边缘智能不断学习新的充电规律，以实现更高的准确率，从而更精准地从复杂信号中提取出电池充电信号，更好地防止危险用电行为发生。

5 新型电力系统专用传感与边缘智能关键挑战与展望

新型电力系统专用传感与边缘智能协同发展，共同组成新型电力系统数字化设备的重要支柱。一方面，专用传感为适应新型电力系统传感需求在电力、材料、物联网等交叉学科发展下提供更强有力的感知手段；另一方面，边缘智能为适应新型电力系统多元参数与数据分布变化提供动态可持续的人工智能支撑。但是，尽管新型电力系统专用传感与边缘智能已取得初步成果，研究尚浅且与工程实际存在差距，仍面临大量关键挑战。因此，结合多种新兴数字化技术，展望新型电力系统专用传感与边缘智能未来发展：

新型电力系统专用传感与边缘智能在数据、软件、硬件、架构等方面仍存在关键挑战。从可操作性来看，需要遵循“数据-硬件-软件-系统-智能”的发展道路循序渐进，逐步迈向专用传感与边缘智能的未来。

1）数据治理是缓解数据爆发式增长与有效样本库匮乏的关键路径，为新型电力系统提供坚实的数据基础。物联网发展以来，海量数据浪费一直是突出的问题[91]。一方面，数据空间需求非常庞大，难以直接存储所有原始数据；另一方面，早期边缘终端不具备算力，甚至缺乏基本的存储功能，具备研究价值的原始训练样本得不到保存。海量潜在价值的数据被直接丢弃，导致新型电力系统在开展故障诊断、负荷预测、智能调控等应用时缺乏有效的训练样本。因此，亟需新型电力系统专用传感与边缘智能对边缘数据进行处理的同时，有效保存具备重要价值的训练样本数据，为未来新型电力系统规划发展提供重要数据支撑。数据治理是一个长期系统工程，利用广泛部署新型电力系统专用传感进行数据滚动收集、过滤处理与自动标签，获取有价值的数据；再利用边缘智能云服务层建立数据共享机制与开放数据平台，供学术界与工业界合理使用，实现社会福利最大化。现阶段适宜小规模、长周期试点后，再逐步推广。

2）隐私保护机制的完善是推动新型电力系统用户数据规范使用的重要保障，同时促进数据治理的进一步发展，以确保数据的安全和规范使用。

随着专用传感与边缘智能的发展，必然在电力物联网上产生大量数据交互，这些数据或是经过预处理的中间数据，或是未经处理的原始数据，这些数据都是隐私敏感的。然而，电力用户隐私安全与电力系统收集信息用于数据分析业务处理存在矛盾，如非侵入式负荷监测技术通过专用传感收集用户入户电信号，通过人工智能分析用户用电习惯与用电行为，无形之中获取用户信息。如何确保相关部门有效保护用户隐私，确保数据信息未用于其他业务，仍需要制定相关政策文件，强化数据监管与审计。同时，在技术措施方面，强化利用端到端加密与差分隐私保护技术，推动边缘智能计算向下层卸载，推广联邦学习等模型训练与优化技术。

3）在传感硬件层面，软件定义硬件是实现多场景灵活应用的标准化硬件设计的创新路径，提供标准化硬件支持。

软件定义硬件赋能多场景灵活应用的标准化硬件。随着新型电力系统快速发展，数字化设备型号与规模不断扩大，需要适用于不同工况的专用传感适配不同的数字化设备。由于专用传感通常大同小异，现有标准体系下需要重复研发设计，缺乏统一且灵活的标准化设计规范。软件定义硬件提供了一种可能有效的解决方案[92]，如图 5 所示，其规范标准化接口与模块化设计，通过软件定义赋予内核

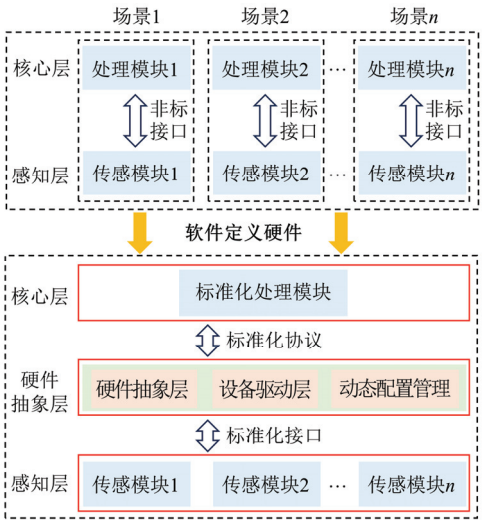


图 5　软件定义硬件

Fig.5　Software defined hardware

相同的专用传感不同的配置参数，以适用不同运行工况与场景所装配的、可灵活拆卸的外围电路。具体而言，现阶段首先建立硬件抽象层和标准化协议。抽象层提供统一硬件接口，设备驱动层桥接感知层与抽象化接口，以较低成本提供类标准化接口功能。其次，开发基于微服务架构的控制平台，感知层设计中引入接口标准化模块，从硬件底层提供标准化功能。最后，开发动态配置参数管理与软件硬件协同优化，允许用户通过控制平台动态修改设备参数，同时，感知层硬件允许进一步标准化模块化设计。软件定义硬件有望实现同类型专用传感适用多种数字化设备与场景，是兼顾新型电力系统多方面应用需求的专用传感与标准化通用设计。

4）在软件层面，业务-算力微服务架构基于软件定义的标准化硬件，是赋予新型电力系统更精细化边缘智能的重要手段，也是实现高效业务处理的关键。

业务-算力微服务赋予新型电力系统更精细化的边缘智能。在电力物联网背景下，为满足多元业务需求，微服务将单一应用程序分解为具有松散耦合和独立部署的微小服务，通过服务之间相互协调、相互配合完成业务，高效有序地组织电力物联网业务[93]。微服务贯穿专用传感与边缘智能的各层结构，将各业务分解为微服务从而在各层分散高效完成。新型电力系统专用传感与边缘智能赋予数字化设备更高级的算力资源，打破了传统集中式的计算框架。值得思考的是，如何更高效地融合微服务体系与专用传感和边缘智能的体系架构，从而进一步实现分布式协同微服务体系，提高系统业务效率。在未来，业务-算力微服务架构下业务服务单元将具备独立部署与扩展能力，满足不同业务需求的同时，将可以更高自由度地灵活调度，实现更为复杂的业务处理与逻辑执行。

5）基于业务-算力微服务架构与软件定义的标准化硬件，为多层级分布式边缘智能与全网专用传感协同联动提供可能，其是助力电力系统泛在智能化的重要支柱，是推动智慧能源管理的核心手段。

多层级分布式边缘智能与全网专用传感协同联动助力泛在智能化。新型电力系统专用传感与边缘智能组成金字塔结构，自顶向下各层级不断扩展，稀疏的上下层联络与集中式的边缘智能无法发挥最大效益。随着全网专用传感四面铺开与计算、通信、存储资源不断下放底层，迫切需要分层级分布式边缘智能与全网专用传感协同联动，以加强新型电力系统专用传感与边缘智能上下层联动与优化资源分配。通过开发适用于新型电力系统边缘智能的模型训练方法，逐步实现弱算力终端边缘训练，以及区域内、区域间各专用传感与边缘智能协同完成区域电力、信息的业务。最终组成专用传感与边缘智能大网络，真正缓解过度集中式的计算中心压力与分布式泛在人工智能。

6）在新型电力系统专用传感与边缘智能全网协同联动的基础上，将进一步推动电力大模型智能的涌现。新型电力系统专用传感与边缘智能的融合是推动电力大模型智能涌现的重要动力，是实现智能电网的关键。

新型电力系统专用传感与边缘智能促进电力大模型智能涌现。通用大模型的崛起，给新型电力系统带来机遇与挑战[94]。其中，通用视觉大模型在新型电力系统中可完成对海量巡检图像的自动处理业务[95]。然而，通用大模型在电力系统各业务中仍存在瓶颈：通用大模型通常难以在算力与存储受限的传感设备上完成推理，样本与知识的匮乏压缩通用大模型在新型电力系统中的应用边界，加剧通用大模型在新型电力系统中的局限性。专用传感与边缘智能未来将赋予电力大模型实际部署应用的可能性，分布式的边缘智能与专用传感收集的数据库满足电力大模型学习业务知识与部署的需要。电力大模型与专用传感和边缘智能等技术的融合将为电力行业提供更为全面和精准的数据支持，提高电网智能化水平。在未来，一方面，加速推进边缘计算设

备的异构计算能力和高效算法的融合，并通过数据协同与动态学习机制，提升系统的自主决策与适应能力。另一方面，通过建立标准化的数据接口和传感器网络，实现不同层级设备之间的数据无缝传输与共享，进一步推动电力系统的智能化和高效化。

专用传感与边缘智能的协同发展是推动电力系统智能化的关键。通过多层级分布式边缘智能与全网专用传感的联动，电力系统将实现泛在智能化，提供更灵活、高效的能源管理与调控。同时，新型电力系统专用传感与边缘智能的融合将推动电力大模型智能化的涌现，为智能电网的建设提供重要动力。未来的发展方向应重点关注专用传感技术的创新与边缘智能计算能力的提升，促进数据共享与协同学习机制的建立，推动电力系统智能化水平向更高层次发展。同时，加强隐私保护机制与数据治理，确保用户隐私安全与数据规范使用，构建智能、高效、可信赖的电力系统。

6 结论

随着新型电力系统发展，爆发式增长的数据、统计分布不断变化的样本、落后的设备传感和静态的人工智能使得新型电力系统维护与发展需要大量人力物力财力投入。本文总结归纳新型电力系统专用传感与边缘智能基本内涵、关键技术、挑战与展望，为上述问题提供解决方案，得到以下结论：

1）深刻揭示新型电力系统专用传感与边缘智能的基本内涵。专用传感多学科融合促进新型电力系统专用传感迈向智能化、小型化、高集成、可持续发展阶段；边缘智能协同调配利用各区域计算、通信、存储资源，促进新型电力系统可持续发展。

2）新型电力系统专用传感与边缘智能体系架构深度融合、高效协同、双向互动。充分发挥专用传感与边缘智能的优势，实现新型电力系统数字化设备高效管理与智能控制，促进新型电力系统智能化、自动化与高效化。

3）新型电力系统专用传感应用国产化高频新型传感技术、绿色供能的高性能嵌入式芯片技术和高可靠性灵活组网技术，促进专用传感各层协同发展，有望显著提升专用传感智能化、自动化与高效化水平。

4）新型电力系统边缘智能的轻量化模型推理技术减少计算模型对边缘终端的资源依赖，云边协同资源均衡技术共享系统计算、通信、存储资源，在线学习持续迭代技术能够持续优化模型。边缘智能各层关键技术交叉互补，为体系架构深度融合提供技术支撑。

5）展望未来新型电力系统专用传感与边缘智能发展方向。在数据方面，数据治理与隐私保护为系统提供安全可靠的样本支撑；在硬件方面，软件定义硬件与业务-算力微服务为系统提供标准化与精细化管理；在系统方面，全网协同联动与电力大模型是实现智能电网的关键举措。以此为愿景，打造智能、高效、可靠的新型电力系统。

总之，新型电力系统专用传感与边缘智能的深度融合，将大大提升电力系统的智能化水平和运行效率。未来，随着技术的不断进步，新型电力系统的专用传感将变得更加智能、精准和多样化，边缘智能将更加灵活、高效地处理海量数据并实时响应复杂的电力需求。其不仅有助于提升电力系统的可靠性和安全性，还将推动电力行业向更加绿色、可持续的发展方向迈进。通过不断探索和创新，未来有望实现一个更加智能、更加高效、更加可靠的新型电力系统，为社会的发展和环境的保护做出更大的贡献。

参考文献 References

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平主持召开中央全面深化改革委员会第二次会议强调：建设更高水平开放型经济新体制 推动能耗双控逐步转向碳排放双控[EB/OL]. (2023-07-11). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6891167.htm?lsRedirectHit=11429508.
The Central People's Government of the People’s Republic of China. Xi Jinping presides over the second meeting of the Central Committee for Comprehensively Deepening Reform and emphasizes: building a higher level of the new open economic system and promoting the gradual shift from dual control of energy consumption to dual control of carbon emissions[EB/OL]. (2023-07-11). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6891167.htm?lsRedirectHit=11429508.

[2] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[3] 国家能源局. 新型能源体系建设提速[EB/OL]. (2024-01-12). https://www.nea.gov. cn/2024-01/12/c_1310759961. htm.
National Energy Administration. Speeding up the construction of a new energy system[EB/OL]. (2024-01-12). https://www.nea.gov.cn/2024-01/12/c_1310759961. htm.

[4] 孙其博，刘 杰，黎 彝，等. 物联网：概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报，2010，33(3)：1-9.
SUN Qibo, LIU Jie, LI Shan, et al. Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology problem[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 1-9.

[5] 仝 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，1-22[2024-04-12]. 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, 1-22[2024-04-12]. https: //doi. org/10.13334/j. 0258-8013. pcsee. 231196.

[6] 国家电网报. 推动电网数字化智能化发展[EB/OL]. (2024-05-09). https://epaper.sgcctop. com/202405/09/con-724205. html.
State Grid News. Promoting the digitalization and intelligent development of power grids[EB/OL]. (2024-05-09). https://epaper. sgcctop. com/202405/09/con-724205. html.

[7] 中国计量网. 校企携手成功填补了国内外智能电能表计量监管领域技术空白[EB/OL]. (2022-12-14). http://www. chinajl. com. cn/xingyedongtai/266204. html.
China Measurement Network. School-enterprise cooperation successfully filled the technical gaps in the field of metering and supervision of smart energy meters at home and abroad[EB/OL]. (2022-12-14). http: //www. chinajl. com. cn/xingyedong-tai/266204. html.

[8] 孙立明，曾　江. 一种面向电力指纹负荷识别的智能插座：202222507323.2[P]. 2022-12-06.
SUN Liming, ZENG Jiang. Intelligent socket for power fingerprint load identification: 202222507323.2[P]. 2022-12-06.

[9] 孙立明，曾　江. 一种电力负荷测控终端：202223140872.7[P]. 2023-05-02.
SUN Liming, ZENG Jiang. Power load measurement and control terminal: 202223140872.7[P]. 2023-05-02.

[10] 孙立明，余　涛. 一种基于机器学习的边缘侧电力指纹识别方法及装置：202211545503.8[P]. 2023-03-10.
SUN Liming, YU Tao. Edge side power fingerprint identification method and device based on machine learning: 202211545503.8[P]. 2023-03-10.

[11] 张雪寒，余　涛. 计及风速与负荷相关性的电-气互联系统概率可靠性评估方法[J]. 高电压技术，2019，45(10)：3263-3272.
ZHANG Xuehan, YU Tao. Probabilistic reliability evaluation method of electricity-gas integrated energy system considering correlation of wind speeds and loads[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3263-3272.

[12] 吉亚娟，王江波. 基于在线潮流反馈优化的配电网光伏电源功率公平分配策略[J/OL]. 电网技术，2024：1-13[2024-06-13]. https://doi. org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2024.0388.
JI Yajuan, WANG Jiangbo. Fair distribution strategy for photovoltaic power in distribution networks based on online power flow feedback optimization[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-13 [2024-06-13]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0388.

[13] 戴睿鹏，窦晓波，喻　洁，等. 含光储充的配网虚拟电厂二次调频随机模型预测控制策略[J/OL]. 电网技术，2024：1-15[2024-06-14]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673. pst. 2023.2039.
DAI Ruipeng, DOU Xiaobo, YU Jie, et al. Secondary frequency control strategy for photovoltaic-storage-charging distribution-level virtual power plant based on stochastic model predictive control[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-15[2024-06-14]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2039.

[14] 王　磊，马佳琪，韩肖清，等. 考虑多状态特征的非侵入式负荷识别方法[J/OL]. 电网技术，2024：1-10[2024-06-13]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1652.
WANG Lei, MA Jiaqi, HAN Xiaoqing, et al. Non-intrusive load monitoring method with multi-state characterization of loads[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-10[2024-06-13]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1652.

[15] ZHAO Z H, WU X X, ZHANG X, et al. ZigBee vs WiFi: understanding issues and measuring performances of their coexistence[C]//2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). Austin, USA: IEEE, 2015: 1-8, doi: 10.1109/PCCC. 2014.7017082.

[16] 张昭宇，胡一丹，宋颜峰，等. 电力设备机械振动-超声波融合检测传感器研制及应用[J]. 中国电机工程学报，2023，43(14)：5713-5722.
ZHANG Zhaoyu, HU Yidan, SONG Yanfeng, et al. Development and application of mechanical vibration-ultrasound combined sensor for power equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5713-5722.

[17] 李　旭，王文森，郭　丽，等. 基于多传感器融合的电力变压器内部放电定位与辨识技术[J]. 电网与清洁能源，2024，40(3)：22-31.
LI Xu, WANG Wensen, GUO Li, et al. Internal discharge location and identification for power transformers based on multi-sensor fusion[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 22-31.

[18] 王旭东，王雷涛，武东亚，等. 基于边缘计算与 LoRa 技术的配电网智能巡检组网方案设计[J]. 广东电力，2020，33(9)：42-48.
WANG Xudong, WANG Leitao, WU Dongya, et al. Design about intelligent inspection network scheme of distribution network based on edge calculation and LoRa technologies[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(9): 42-48.

[19] 胡雪凯，罗　蓬，王文瑞，等. 基于边缘计算的变电站异构传感网关设计[J]. 河北电力技术，2022，41(3)：48-53.
HU Xuekai, LUO Peng, WANG Wenrui, et al. Design and research of substation heterogeneous sensing gateway based on edge computing[J]. Hebei Electric Power, 2022, 41(3): 48-53.

[20] 司马文霞，胡广富，杨　鸣，等. 融合边缘计算的互感器宽频电压测量方法[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1644-1652.
SIMA Wenxia, HU Guangfu, YANG Ming, et al. Wideband voltage measurement method of instrument transformer using edge computing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1644-1652.

[21] 赵　丹，肖继学，刘　一. 智能传感器技术综述[J]. 传感器与微系统，2014，33(9)：4-7.
ZHAO Dan, XIAO Jixue, LIU Yi. Overview of smart sensor technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(9): 4-7.

[22] SONG E Y, FITZPATRICK G J, LEE K B, et al. A methodology for modeling interoperability of smart sensors in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 555-563.

[23] SONG E Y, FITZPATRICK G J, LEE K B. Smart sensors and standard-based interoperability in smart grids[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7723-7730.

[24] SONG E Y, FITZPATRICK G J, LEE K B, et al. Interoperability testbed for smart sensors in smart grids[C]//2018 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Washington, USA: IEEE, 2018: 1-5.

[25] 王　毅，刘黎明，李松浓，等. 基于经验小波变换复合熵值与特征融合的故障电弧检测[J]. 电网技术，2023，47(5)：1912-1919.
WANG Yi, LIU Liming, LI Songnong, et al. Arc fault detection based on empirical wavelet transform composite entropy and feature fusion[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1912-1919.

[26] 杨　帆，李雅海，卢文斌，等. 高压电气设备局部放电过程超高频信号监测方法[J]. 电网与清洁能源，2022，38(11)：55-60，70.
YANG Fan, LI Yahai, LU Wenbin, et al. Ultra-high frequency signal monitoring method for partial discharge process of high-voltage electrical equipment[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 55-60, 70.

[27] 张丽娜，黄　怿，汪良杰，等. 高灵敏硅凹槽膜片型光纤 F-P 局部放电超声传感器[J]. 电力工程技术，2023，42(5)：2-9.
ZHANG Lina, HUANG Yi, WANG Liangjie, et al. High sensitivity fiber optic F-P partial discharge ultrasonic sensor based on a grooved silicon diaphragm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 2-9.

[28] 雷芳菲，褚继峰，刘　洋，等. 基于半导体气体传感阵列的电缆过热故障诊断方法[J]. 电工技术学报，2023，38(13)：3651-3664.
LEI Fangfei, CHU Jifeng, LIU Yang, et al. Fault diagnosis of cable overheating based on semiconductor gas sensing array[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3651-3664.

[29] 郝　洋，高　妍，张红娟，等. 基于复合干涉原理的局部放电检测光纤传感器[J]. 传感技术学报，2023，36(3)：373-379.

HAO Yang, GAO Yan, ZHANG Hongjuan, et al. Optical fiber sensor for partial discharge detection based on composite interference principle[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(3): 373-379.

[30] 伍 弘，马飞越，牛 勃，等. 一种一体化多功能特高频传感器的设计与应用[J]. 宁夏电力，2019(2)：22-26，36.
WU Hong, MA Feiyue, NIU Bo, et al. Design and application of a kind of integrated multifunctional UHF sensor[J]. Ningxia Electric Power, 2019(2): 22-26, 36.

[31] 江 翼，刘正阳，王文瑞，等. 基于边云协同的变电设备多状态量监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(6)：138-144.
JIANG Yi, LIU Zhengyang, WANG Wenrui, et al. Research on multi-state monitoring system of substation equipment based on edge-cloud collaboration[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 138-144.

[32] 秦潘昊，陈威宇，胡秦然，等. 新型电力系统设备状态监测与故障诊断传感芯片关键技术与展望[J]. 电力系统自动化，2024，48(6)：83-95.
QIN Panhao, CHEN Weiyu, HU Qinran, et al. Key technologies and prospect of equipment condition monitoring and diagnosis sensor chips for new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 83-95.

[33] 曹 培，徐 鹏，高 凯，等. 基于边缘计算的电缆接头运行状态智能传感与监测[J]. 高压电器，2020，56(9)：26-32.
CAO Pei, XU Peng, GAO Kai, et al. Intelligent sensing and monitoring of cable joints' state based on edge computing[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 26-32.

[34] 杨 帆，朱 力，刁冠勋，等. 面向电力设备数字孪生的 RFID 传感器与数据传输协议设计[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1634-1643.
YANG Fan, ZHU Li, DIAO Guanxun, et al. Design of RFID sensor and data transmission protocol for digital twin of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1634-1643.

[35] 沈培锋，陈 挺，鞠 玲，等. 基于分级广播的电力物联网无线传感时间同步方法[J]. 电气自动化，2023，45(6)：34-37.
SHEN Peifeng, CHEN Ting, JU Ling, et al. Wireless sensor time synchronization method for power Internet of Things based on hierarchical broadcasting[J]. Electrical Automation, 2023, 45(6): 34-37.

[36] 陈云帆. 电力系统中 5G 移动通信与物联网技术的应用研究[J]. 光源与照明，2024(1)：77-79.
CHEN Yunfan. Research on the application of 5G mobile communication and Internet of Things technology in power system[J]. Lamps & Lighting, 2024(1): 77-79.

[37] 张嘉伟，魏晓飞，蒙 轩，等. 面向新型电力系统的微磁场光学感知技术[J]. 工程科学与技术，2023，55(4)：3-10.
ZHANG Jiawei, WEI Xiaofei, MENG Xuan, et al. Optical sensing technology of micro-magnetic field for the new power system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(4): 3-10.

[38] 周振宇，陈亚鹏，潘 超，等. 面向智能电力巡检的高可靠低时延移动边缘计算技术[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1895-1902.
ZHOU Zhenyu, CHEN Yapeng, PAN Chao, et al. Ultra-reliable and low-latency mobile edge computing technology for intelligent power inspection[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1895-1902.

[39] 白昱阳，黄彦浩，陈思远，等. 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[J]. 自动化学报，2020，46(3)：397-410.
BAI Yuyang, HUANG Yanhao, CHEN Siyuan, et al. Cloud-edge Intelligence: status quo and future prospective of edge computing approaches and applications in power system operation and control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 397-410.

[40] 张 彦，张 科，曹佳钰. 边缘智能驱动的车联网[J]. 物联网学报，2018，2(4)：40-48.
ZHANG Yan, ZHANG Ke, CAO Jiayu. Internet of vehicles empowered by edge intelligence[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(4): 40-48.

[41] 楚俊生，张博山，林兆骥. 边缘计算在物联网领域的应用及展望[J]. 信息通信技术，2018，12(5)：31-39.
CHU Junsheng, ZHANG Boshan, LIN Zhaoji. Application and expectation of edge computing in Internet of Things[J]. Information and Communications Technologies, 2018, 12(5): 31-39.

[42] 周 知，于 帅，陈 旭. 边缘智能：边缘计算与人工智能融合的新范式[J]. 大数据，2019，5(2)：53-63.
ZHOU Zhi, YU Shuai, CHEN Xu. Edge intelligence: a new nexus of edge computing and artificial intelligence[J]. Big Data Research, 2019, 5(2): 53-63.

[43] 刘嘉恒，张 明，葛磊蛟，等. 基于改进郊狼优化算法的光伏智能边缘终端优化配置方法[J]. 电工技术学报，2021，36(7)：1368-1379.
LIU Jiaheng, ZHANG Ming, GE Leijiao, et al. Optimal configuration method of photovoltaic intelligent edge terminal based on improved coyote optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1368-1379.

[44] 陈晓江，叶运球，蒋道环，等. 基于边缘计算技术的智能集中器多元负荷管理设计[J]. 电测与仪表，2021，58(8)：17-27.
CHEN Xiaojiang, YE Yunqiu, JIANG Daohuan, et al. Design of pluralistic load management for intelligent concentrator based on edge computing technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 17-27.

[45] 马富齐，王 波，董旭柱，等. 电力视觉边缘智能：边缘计算驱动下的电力深度视觉加速技术[J]. 电网技术，2020，44(6)：2020-2029.
MA Fuqi, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Power vision edge intelligence: power depth vision acceleration technology driven by edge computing[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2020-2029.

[46] 段玉飞，王 伟. 基于物联网的输电线路智能监测系统研究与应用[J]. 电力信息与通信技术，2019，17(7)：21-28.
DUAN Yufei, WANG Wei. Research and application of intelligent monitoring system for transmission line based on Internet of Things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(7): 21-28.

[47] 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.

[48] 陈永东，刘友波，沈晓东，等. 面向城市能源系统分布式资源的边缘智能技术综述[J]. 电力系统自动化，2022，46(17)：142-152.
CHEN Yongdong, LIU Youbo, SHEN Xiaodong, et al. Review of edge intelligence technology for distributed energy resources in urban energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 142-152.

[49] 许 薇，邹旭东，张志红，等. 基于微机电系统(MEMS)的磁通门传感器研究进展[J]. 磁性材料及器件，2023，54(2)：95-101.
XU Wei, ZOU Xudong, ZHANG Zhihong, et al. Research progress of fluxgate sensors based on MEMS[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2023, 54(2): 95-101.

[50] 马宏忠，肖雨松，孙永腾，等. 基于 ICEEMDAN 和时变权重集成预测模型的变压器油中溶解气体含量预测[J]. 高电压技术，2024，50(1)：210-220.
MA Hongzhong, XIAO Yusong, SUN Yongteng, et al. Prediction of dissolved gas concentration in transformer oil based on ICEEMDAN and time-varying weight integrated prediction model[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 210-220.

[51] 胡正勇，司文荣，崔 律，等. 基于隧穿磁阻效应的非侵入式高灵敏度电流传感器研究[J]. 中国测试，2022，48(增刊 2)：139-142.
HU Zhengyong, SI Wenrong, CUI Lü, et al. Research on the nonintrusive high sensitivity surface mount current sensor based on tunneling magnetoresistance[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(Supplement 2): 139-142.

[52] 王喜全，潘 臻，苏军虎. 基于就地数据采集模型的架空输电线路

动态增容方法[J]. 信息技术，2023(8)：142-147.
WANG Xiquan, PAN Zhen, SU Junhu. Dynamic capacity increase method of overhead transmission lines based on local data acquisition model[J]. Information Technology, 2023(8): 142-147.

[53] 中国能源网. 南方电网科技创新成果亮相科博会[EB/OL]. (2023-05-26). https://www.cnenergynews.cn/dianwang/2023/05/26/detail_20230526133161.html.
China Energy News. Science and technology innovation achievements of China southern power grid at science fair[EB/OL]. (2023-05-26). https://www.cnenergynews.cn/dianwang/2023/05/26/detail_20230526133161. html.

[54] 2023 量子产业大会. 协同创新，共促量子产业加快发展[EB/OL]. (2023-09-26). https://www. qiconf. com/news/511. html.
2023 Quantum Industry Conference. Synergistic innovation for accelerated development of quantum industry[EB/OL]. (2023-09-26). https://www. qiconf. com/news/511. html.

[55] 国务院国有资产监督管理委员会. 中央企业科技创新成果产品手册(2022 年版)[EB/OL]. (2023-05-20). http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n22624391/n26705666/n26757703/c26862158/content.html.
State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. Product manual of science and technology innovation achievements of central enterprises (2022 Edition)[EB/OL]. (2023-05-20). http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n22624391/n26705666/n26757703/c26862158/content. html.

[56] 陈军健，李肖博，姚 浩，等. 基于国产伏羲芯片的智能站继电保护装置软硬件平台设计[J]. 电子器件，2022，45(3)：688-694.
CHEN Junjian, LI Xiaobo, YAO Hao, et al. Software and hardware platform design for relay protection device in intelligent substation based on domestic FUXI chip[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(3): 688-694.

[57] CHEN Y T, NAZHAMAITI M, XU H, et al. All-analog photoelectronic chip for high-speed vision tasks[J]. Nature, 2023, 623(7985): 48-57.

[58] 单栋梁，刘向立，徐利凯，等. 用户侧光储充一体化智能微电网系统应用研究[J]. 电器与能效管理技术，2020(2)：41-46.
SHAN Dongliang, LIU Xiangli, XU Likai, et al. Research on application of intelligent micro-network system with user side light storage and charge integration[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(2): 41-46.

[59] 工人日报. 新疆无人区电力设施维护获突破[EB/OL]. (2023-02-27). https://baijiahao.baidu.com/s?id=1758986619212435711&wfr=spider&for=pc.
Workers' Daily. Breakthrough in maintenance of power facilities in uninhabited areas of Xinjiang[EB/OL]. (2023-02-27). https://bai-jiahao.baidu. com/s?id=1758986619212435711&wfr=spider&for=pc.

[60] 黄益庄，李树军. 配电网智能监控管理远程抄表一体化系统[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(21)：83-86，90.
HUANG Yizhuang, LI Shujun. Integrated system with intelligent monitoring management and remote metering for power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 83-86, 90.

[61] 冯蓉珍. 基于电力载波通信的远程路灯监控系统设计[J]. 电力系统通信，2010，31(10)：65-68，71.
FENG Rongzhen. Remote monitoring and control system for street lamp based on power line carrier communication[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(10): 65-68, 71.

[62] 林景栋，秦玉龙，廖孝勇. 电力载波通信动态组网算法的研究[J]. 控制工程，2013，20(5)：841-843，848.
LIN Jingdong, QIN Yulong, LIAO Xiaoyong. The research of algorithm for dynamic network of power line carrier communications[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(5): 841-843, 848.

[63] 曹军威，万宇鑫，涂国煜，等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报，2013，36(1)：143-167.
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information system architecture for smart grids[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167.

[64] 周 全，周 柯，金庆忍，等. 卫星互联网赋能新型电力系统创新应用[J]. 电力系统自动化，2024，48(6)：42-61.
ZHOU Quan, ZHOU Ke, JIN Qingren, et al. Novel applications of satellite internet enabling new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 42-61.

[65] 中华人民共和国国家互联网信息办公室. 国家互联网信息办公室发布《数字中国发展报告(2022 年)》[EB/OL]. (2023-05-23). https://www.cac.gov.cn/2023-05/22/c_1686402318492248. htm.
Cyberspace Administration of China. State internet information office releases digital china development report (2022)[EB/OL]. (2023-05-23). https://www.cac.gov. cn/2023-05/22/c_1686402318492248. htm.

[66] CHEN Z Z, XIANG J Y, LU Y, et al. RGP: neural network pruning through regular graph with edges swapping[J/OL]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023: 1-13[2024-05-23]. https://ieeexplore. ieee. org/document/10149178.

[67] YU F, CUI L, WANG P C, et al. EasiEdge: a novel global deep neural networks pruning method for efficient edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(3): 1259-1271.

[68] LIU M R, FANG W W, MA X D, et al. Channel pruning guided by spatial and channel attention for DNNs in intelligent edge computing[J]. Applied Soft Computing, 2021, 110: 107636.

[69] TEERAPITTAYANON S, MCDANEL B, KUNG H T. BranchyNet: fast inference via early exiting from deep neural networks[C]// 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Cancun, Mexico: IEEE, 2016: 2464-2469.

[70] WU Z X, NAGARAJAN T, KUMAR A, et al. BlockDrop: dynamic inference paths in residual networks[C]// Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, USA: IEEE, 2018: 8817-8826.

[71] WANG X, YU F, DOU Z Y, et al. SkipNet: learning dynamic routing in convolutional networks[C]// Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Munich, Germany: Springer, 2018: 420-436.

[72] DAI C, LIU X G, CHENG H Q, et al. Compressing deep model with pruning and tucker decomposition for smart embedded systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(16): 14490-14500.

[73] 谈竹奎，程乐峰，史守圆，等. 能源互联网接入设备关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(14)：140-152.
TAN Zhukui, CHENG Lefeng, SHI Shouyuan, et al. Discussion on key technologies of energy internet access equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 140-152.

[74] FAN W H, GAO L, SU Y, et al. Joint DNN partition and resource allocation for task offloading in edge-cloud-assisted IoT environments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(12): 10146-10159.

[75] 郝 昊，杨树杰，张 玮. 算网融合下时间连续的计算任务卸载机制[J]. 计算机研究与发展，2023，60(4)：735-749.
HAO Hao, YANG Shujie, ZHANG Wei. Time-Continuous computing task offloading mechanism for computing and network convergence[J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(4): 735-749.

[76] FAN Y, GE J D, ZHANG S, et al. Decentralized scheduling for concurrent tasks in mobile edge computing via deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(4): 2765-2779.

[77] ZHANG Z Y, ZHAO Y, LI H, et al. DVFO: Learning-based DVFS for energy-efficient edge-cloud collaborative inference[J/OL]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024: 1-18[2024-05-23]. https://ieeexplore. ieee. org/document/10412103.

[78] QU K G, ZHUANG W H, WU W, et al. Stochastic cumulative DNN inference with RL-aided adaptive IoT device-edge collaboration[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(20): 18000-18015.

[79] 白 巍，张东磊，付俭定，等. 基于 DDPG 的换流站融合终端任务卸载与资源调度方法[J]. 电力信息与通信技术，2024，22(3)：58-64.
BAI Wei, ZHANG Donglei, FU Jianding, et al. DDPG-based task offloading and resource scheduling method for converter station fusion terminals[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(3): 58-64.
[80] XU X D, YAN K W, HAN S J, et al. Learning-based edge-device collaborative DNN inference in IoVT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 7989-8004.
[81] FAN W H, CHEN Z Y, HAO Z B, et al. DNN deployment, task offloading, and resource allocation for joint task inference in IIOT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2): 1634-1646.
[82] HUANG J W, WAN J Y, LV B F, et al. Joint computation offloading and resource allocation for edge-cloud collaboration in internet of vehicles via deep reinforcement learning[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(2): 2500-2511.
[83] AL-HAMMADI I, LI M C, ISLAM S M N, et al. Collaborative computation offloading for scheduling emergency tasks in SDN-based mobile edge computing networks[J]. Computer Networks, 2024, 238: 110101.
[84] TANG Z Q, JIA W J, ZHOU X J, et al. Representation and reinforcement learning for task scheduling in edge computing[J]. IEEE Transactions on Big Data, 2022, 8(3): 795-808.
[85] LI Q R, GUO M, PENG Z P, et al. Edge-cloud collaborative computation offloading for mixed traffic[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(3): 5023-5034.
[86] MA H R, LI R, ZHANG X X, et al. Reliability-aware online scheduling for DNN inference tasks in mobile-edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(13): 11453-11464.
[87] ZHANG L T, XU J. Learning the optimal partition for collaborative DNN training with privacy requirements[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 11168-11178.
[88] WANG Y, QIN Y B, DENG D Z, et al. Trainer: an energy-efficient edge-device training processor supporting dynamic weight pruning[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2022, 57(10): 3164-3178.
[89] YIN L F, MA C X. Interpretable incremental voltage-current representation attention convolution neural network for nonintrusive load monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(12): 11776-11787.
[90] BAI Y, CHEN L X, ABDEL-MOTTALEB M, et al. Automated ensemble for deep learning inference on edge computing platforms[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(6): 4202-4213.
[91] 韩 青，高昆仑，赵 婷，等. 边云协同智能技术在电力领域的应用[J]. 物联网学报，2021，5(1)：62-71.
HAN Qing, GAO Kunlun, ZHAO Ting, et al. Application of edge-cloud collaborative intelligence technologies in power grids[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2021, 5(1): 62-71.
[92] 吕 军，栾文鹏，刘日亮，等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J]. 电网技术，2018，42(10)：3108-3115.
LÜ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution Internet of Things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115.
[93] 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.
[94] 李 鹏，余 涛，李立涅，等. 电力人工智能的演变与展望——从专业智能走向通用智能[J/OL]. 电力系统自动化，1-21[2024-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP. 20240621.1336.002. html.
LI Peng, YU Tao, LI Licheng, et al. Retrospect and prospect of artificial intelligence for electric power system-from domain intelligence to general intelligence[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-21[2024-07-09]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240621.1336.002. html.
[95] 赵振兵，冯 烁，席 悦，等. 大模型时代：电力视觉技术新起点[J]. 高电压技术，2024，50(5)：1813-1825.
ZHAO Zhenbing, FENG Shuo, XI Yue, et al. The era of large models: a new starting point for electric power vision technology[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 1813-1825.



余 涛
1974—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为复杂电力系统的非线性控制理论、优化及机器学习
E-mail: taoyu1@scut.edu.cn

YU Tao
Ph.D., Professor



梁敏航
2000—，男，博士生
主要研究方向为电力物联网和人工智能在新型电力系统中的应用
E-mail: epmhliang@qq.com

LIANG Minhang
Ph.D. candidate



罗庆全(通信作者)
1999—，男，博士生
主要研究方向为负荷监测和人工智能在新型电力系统中的应用
E-mail: epqqluo@qq.com

LUO Qingquan
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期 2024-04-30 修回日期 2024-07-12 编辑 卫李静