

## 面向绿色计算的算网能一体化：架构、关键问题与挑战

谢人超<sup>1,2</sup>, 胡珉昊<sup>1</sup>, 唐琴琴<sup>1</sup>, 黄韬<sup>1,2</sup>, 彭开来<sup>2</sup>, 文雯<sup>1</sup>, 罗必雄<sup>3</sup>, 张力<sup>3</sup>, 句赫<sup>3</sup>, 李舒涛<sup>3,4</sup>

(1.北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876; 2.紫金山实验室, 江苏南京 211111;  
3.中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100013; 4.广东工业大学自动化学院, 广东广州 510006)

**摘要:** 随着新型网络业务的快速发展, 绿色算力需求愈加迫切, 传统算力网络在满足服务需求的同时面临能耗与碳排放双重压力。聚焦算力、网络与能源协同创新, 首先提出了算网能一体化的概念, 明确了算网能一体化的定义、内涵及意义; 其次, 提出了算网能一体化功能架构与通信流程; 随后, 从度量、感知、交易与调度4个维度探讨了研究难点与挑战; 最后, 结合几个应用场景阐释了其实际价值, 并提出了一些开放性问题, 旨在为绿色低碳转型与数字中国战略实施提供支撑。

**关键词:** 绿色算力; 算力网络; 协同创新; 关键技术

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2025133

## Integration of computing network energy for green computing: architecture, key issues and challenges

XIE Renchao<sup>1,2</sup>, HU Minhao<sup>1</sup>, TANG Qinqin<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>1,2</sup>, PENG Kailai<sup>2</sup>, WEN Wen<sup>1</sup>,  
LUO Bixiong<sup>3</sup>, ZHANG Li<sup>3</sup>, JU He<sup>3</sup>, LI Shutao<sup>3,4</sup>

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China  
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China  
3. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100013, China  
4. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** With the rapid development of new network services, the demand for green computing power has become increasingly urgent, while traditional computing power networks face dual pressures of energy consumption and carbon emissions in meeting service demands. Focusing on the collaborative innovation of computing power, network, and energy, the concept of computing network energy integration was first proposed, and its definition, connotation, and significance were clarified. Subsequently, the functional architecture and communication processes of computing network energy integration were presented. Following this, research challenges and difficulties were discussed from four dimensions: measurement, perception, transaction, and scheduling. Finally, practical value was illustrated through several application scenarios, and several open questions were raised, with the aim of providing support for green and low-carbon transformation and the implementation of the digital China strategy.

**Keywords:** green computing power, computing power network, collaborative innovation, key technology

### 0 引言

随着增强现实/虚拟现实、自动驾驶/车联网、远程医疗以及智慧交通等新兴业务的不断出现, 传统

的集中式云计算模式在实时性、能效等方面面临严峻挑战。边缘计算<sup>[1]</sup>通过将计算资源下沉至网络边缘, 有效降低了服务时延, 但分布式资源的协同调

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-07-21

通信作者: 唐琴琴, qqtang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62171046)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.62171046)

度问题随之凸显。在此背景下,算力网络这一概念应运而生<sup>[2-4]</sup>。算力网络以算力为核心,网络为基础,智能化为驱动,通过深度融合基础网络(主要为通信网络)、云计算、大数据、人工智能、边缘计算等多种信息技术,旨在实现分布式计算节点的互联与统一调度,从而优化网络和计算资源的利用效率。

算力网络的概念随着数字经济的发展不断演进,并在多项国家政策的支持下得以完善。我国先后出台一系列政策文件<sup>[5-8]</sup>,系统推进“东数西算”工程与算网融合建设,优化算力基础设施布局等。国际上,美国在2020年11月发布了《引领未来先进计算生态系统战略规划》<sup>[9]</sup>,欧盟在2021年3月发布了“2030数字指南针”计划<sup>[10]</sup>,均将算力基础设施作为战略重点。

随着科技的不断进步和算力网络的持续发展,数据资源存储和算力需求呈爆发式增长,进而导致算力网络的能耗和碳排放急剧上升,能源已成为算力网络发展中不可忽视的关键因素。以数据中心为例,2020年我国数据中心耗电量突破900亿千瓦时,碳排放量达0.6亿吨。据中国信息通信研究院云计算与大数据研究所测算,到2030年,我国数据中心耗电量将超过3800亿千瓦时<sup>[11]</sup>。2023年10月,工业和信息化部等六部门联合发布了《算力基础设施高质量发展行动计划》,该计划提出了“算力+能源”战略,加快建设能源算力应用中心,支持能源智能生产调度系统,实现源网荷互动、多能协同互补和用能需求的智能调控,目标是推动算力网络实现绿色低碳发展<sup>[12]</sup>。随着“双碳”战略的推进,绿色低碳已成为各行业发展的必然趋势。算力网络作为数字经济的核心基础设施,其能耗和碳排放问题亟待解决,如何实现算力网络与能源系统的协同创新,也将成为未来研究的热点和难点。

本文系统性地提出了“算网能一体化”的概念,从理论层面明确定义算网能一体化的内涵,提出面向绿色计算的方案,探索算网能深度融合的实现路径,旨在通过算力网络与能源系统的深度融合,实现算力资源与能源电力的统筹调配,赋能人工智能等新业态,推动绿色低碳转型,为数字中国建设提供支撑。

## 1 算力网络与算力能源协同创新概述

本节将对算力网络以及算力网络与能源协同创

新的研究进行简要概述,为算网能一体化方案设计和关键问题分析提供理论基础。

### 1.1 算力网络概述

算力网络作为支持国家战略的基石,不仅紧密对接国家规划,更是“东数西算”工程国家战略部署的关键,为推动国家新型基础设施的深度发展提供了全新路径。当前,无论是学术界还是产业界,都在积极推进算力网络的研究与发展<sup>[13]</sup>。本节将从产业、标准化和学术三方面概述算力网络的研究现状。

在产业方面,网络运营商与设备供应商积极推动算力网络的进展,发布了多部白皮书<sup>[14-17]</sup>,介绍和分析了算力网络的背景、概念、架构、关键技术、标准和生态系统等。目前主流的算力网络体系架构如图1所示。中国移动推出了全球首台算力路由器,在网络中融合计算因子,聚集算力感知、通告、联合路由等功能,是我国在算力网络领域取得的一项重大原创性突破。并且在2024算力网络大会上正式发布了一体化算力网络领航数智产业行动计划,集中展示了在算力、算网、算数、算脑等方面的发展成果,并宣布将推动算力网络加速迈向3.0新阶段。算力网络算网一体创新发展论坛于2024年11月30日召开,期间发布了算力路由协同推进行动计划、算力网络产业十大创新成果等,该成果涵盖算力路由、智融标识网络、高通量数据网、互联调度平台、网络数字孪生等多个方向。

在标准化方面,2021年7月,国际电信联盟电信标准部(ITU-T, international telecommunication union telecommunication)发布了算力网络的第一个国际标准Y.2501,规定了算力网络的功能架构<sup>[18]</sup>。2023年,国际互联网工程任务组成立了算力路由工作组,致力于开展算力路由由相关标准的深入研究工作<sup>[19]</sup>。同年7月,ITU-T发布了算力网络服务部署信令要求(Q.4140)标准<sup>[20]</sup>。在中国,通信标准化协会同样正积极推进算力网络系列标准的制定工作,其中,《算力网络总体技术要求》已被正式批准为行业标准YD/T 4255-2023<sup>[21]</sup>。

在学术方面,研究人员围绕算力网络进行了广泛的探索。文献[22]阐述了支撑计算优先网络(CFN, compute first networking)的基本架构和关键技术,并探讨了未来CFN研究的前景。文献[23]针对无线算力网络(WCPN, wireless computing

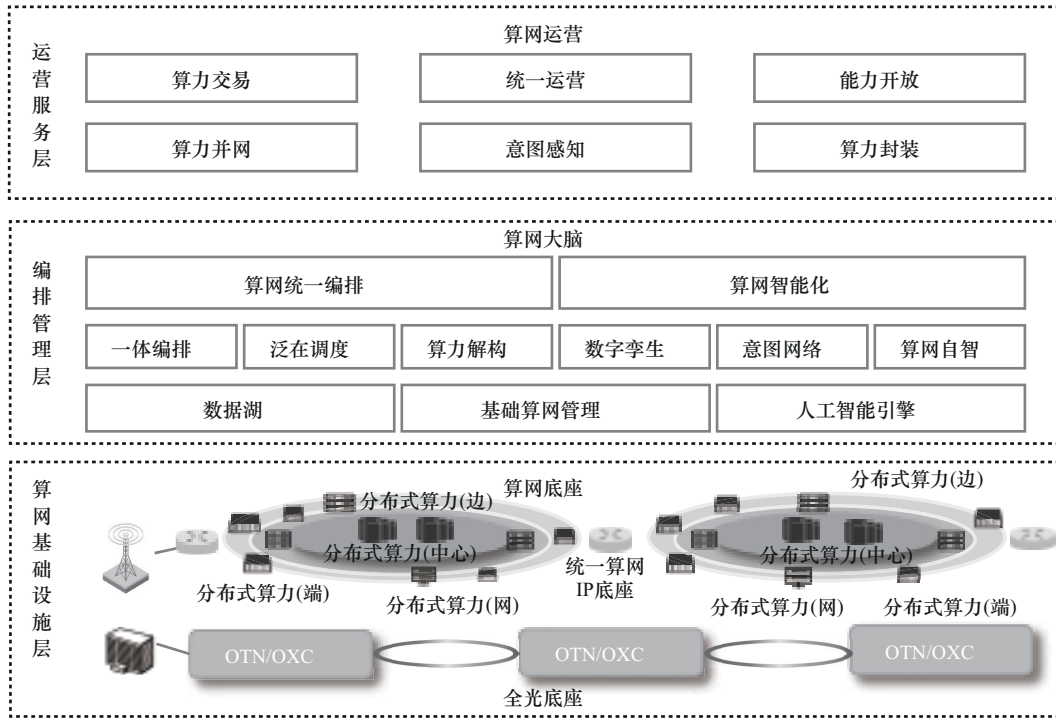


图1 算力网络体系架构<sup>[14]</sup>

power network) 提出了一种基于区块链的可证明的安全分散的联邦学习, 其中节点可以自由参与或离开 WCPN 联邦训练, 不受授权和安全威胁。文献[24]提出了一种基于多智能体深度强化学习算法的优化方法, 该方法在软件定义网络架构内运行, 解决算力网络内数据传输的效率问题。

### 1.2 算力网络与能源协同创新研究概述

算力网络与能源协同创新是当前研究的重要方向, 具有显著的学术价值与实践意义。近年来, 我国出台了一系列算电协同相关的政策, 目标是推动国家算力网络的规模化高效化建设和运营, 最终实现算力普惠, 支撑我国各行各业高质量发展。本节将从产业和学术两方面对算力网络与能源协同创新研究进行概述。

在产业方面, 中国移动率先研究低碳的算力网络架构等, 以“网”为中心, 协同“算”和“能”, 提供统一智能编排, 支持低碳算网服务<sup>[25]</sup>。2023年11月, 阿里云数据中心创新团队与华北电力大学合作的“面向碳中和的数据中心算力-电力协同能量管理和任务调度系统”荣获联合国工发组织 Global Call 2023 全球创新一等奖。该系统通过灵活调度业务负载, 实现了数据中心电力负荷的时空转移, 降低了数据中心的能耗和碳排放, 助力绿色电

力系统建设和可再生能源利用。2024年, 中能建甘肃庆阳“东数西算”源网荷储一体化智慧零碳大数据产业园示范项目, 通过源网荷储一体化解决方案, 推动算力与绿色电力融合, 助力数据中心绿色发展。呼和浩特市同样积极发挥绿色算力优势, 持续提高绿电比例, 全面提升算力网络基础设施的算效和能效, 加强节能降碳技术的创新应用。同年9月, 南方电网公司发布《电力算力协同行动计划》, 加速构建电力与算力协同规划、建设、调度和交易的新基建模式, 进一步推动电力与算力深度融合, 服务数字经济高质量发展。

在学术方面, 算力网络与能源协同创新主要体现在能耗预测、优化调度等方面。为提高数据中心能耗预测的准确性, 文献[26]提出了一种新的基于改进循环神经网络的能耗预测模型, 该模型以能耗预测误差最小为目标进行优化。文献[27]利用多智能体强化学习范式的最新进展, 设计和开发了一个多智能体强化学习框架, 用于优化跨多云环境的工作流执行的绿色能源利用。文献[28]从信息与能源关联的角度出发, 提出了一种面向低碳数据中心运行的在线作业调度方案。为解决大规模异构计算任务的挑战, 提出了一种基于深度强化学习的方法解决能量感知调度问题, 并实现最优在线策略。通过

实际数据的案例研究结果表明,该方法在有效降低数据中心的碳排放和能源成本的同时,能够保持云产品的服务质量(QoS, quality of service)。

## 2 算网能一体化

本节将从定义、内涵和意义三方面展开阐述对于算网能一体化的理解。

### 2.1 算网能一体化的定义和内涵

算网能一体化是指通过算力、网络与能源的深度融合与协同发展,实现资源的优化配置和高效利用。具体而言,借助通信网络设施、异构计算设施及能源基础设施的紧密配合,对算力、网络、数据及能源等资源进行统一调度与管理,促进计算、网络与能源的互联互通与共享利用,推动各领域的协同创新和可持续发展进程。

算力、网络与能源之间呈现紧密的协同关系。从能源支撑角度来看,算力设施(如数据中心)和网络设施(如基站)均高度依赖电力供应,其运行效率直接影响能源系统的负荷分布。从赋能作用角度来看,算力通过智能算法和大数据分析实现能源的动态优化调度,如依据时空差异分配计算任务以提升能效。网络则依托实时数据传输与广域覆盖能力,为能源系统的状态监测、供需匹配与远程控制提供关键通信保障。

算网能一体化的内涵大致分为资源一体化、设施一体化、数据一体化、管理一体化和服务一体化 5 个部分。

1) 资源一体化。将算力、网络与能源视为深度融合的一体化资源,通过统一编排与管理,实现资源的共享与优化配置,提高资源利用效率,降低能耗,以满足各类应用场景的需求,为上层应用提供支撑。

2) 设施一体化。构建集“计算”“网络”与“能源”于一体的一体化设施。以云计算数据中心、智能计算中心及高性能计算中心等为核心,依托通信网络基础设施,整合多种能源设施,并融入前沿技术,实现设施的协同运作与资源共享,降低建设与运维成本。

3) 数据一体化。整合算网能设施中的网络数据、计算数据、能源数据、环境数据、应用数据及安全数据,建立统一的数据范式,构建标准化的数据资源池,实现数据的高效存储、处理和共享,支

持复杂应用场景的数据分析和挖掘。

4) 管理一体化。通过综合协调网络、计算及能源等多种资源,以服务场景的运维管理需求为导向进行建模,构建场景化运维管理模型,并结合前沿技术形成具备自学习能力的中台,实现统一智能决策与自动化运维管理,提升管理效率。

5) 服务一体化。以行业用户需求为导向,提供统一且个性化的服务能力,主要包括算力即服务、网络即服务和能源即服务,满足不同用户在算网能一体化系统中的各种需求,并支持数字化和智能化的应用场景。

### 2.2 算网能一体化的意义

算网能一体化有利于提高资源利用效率、降低能源消耗、提升服务质量、提高系统灵活性和降低管理成本,并且支持新业务模式,在推动数字化和绿色低碳转型以及促进信息技术的创新等方面具有重要意义。具体来说分为以下几个方面。

1) 资源优化利用。算力、网络和能源是数字化时代的核心资源,通过一体化管理和协同发展,可以实现资源的最优配置和利用,提高效率和性能。

2) 降低能耗碳排放。能源在算网基础设施中占据重要地位,通过算网能一体化,可以促进可再生能源的消耗,提高能源效率,降低碳排放。

3) 提升服务质量。算网能一体化可以实现计算、网络和能源的互联互通和资源共享,提高服务的响应速度和质量,满足用户的需求。

4) 支持新业务模式。一体化的算网能架构可以为新业务模式提供支持,如人工智能生成内容、物联网等领域的算网服务,从而促进数字经济的蓬勃高质量发展。

5) 提高系统灵活性。算网能一体化可以实现资源的动态分配和调度,提高系统的灵活性和可扩展性,适应不断变化的业务需求和环境条件。

6) 降低管理成本。通过统一编排管控调度多种资源,能够简化管理流程,降低管理成本,提高管理效率和可维护性。

## 3 算网能一体化方案设计

### 3.1 设计原则

一方面,传统算力网络主要聚焦于提升计算和网络性能,以满足日益增长的计算需求。然而,

随着大模型的发展,算力需求呈几何级数增长,超高算力伴随的高能耗问题与绿色低碳目标形成冲突。因此,未来算力网络需在保障高性能的同时,实现低能耗与碳排放。另一方面,传统算力网络调度多关注于节点计算能力和网络链路状态,而忽略能源供给结构的影响。但在算网能一体化框架下,能耗与碳排放将成为关键因素。即使网络条件优越,若算力节点依赖非可再生能源(火、电等),仍将导致高碳排放。因此,算网能一体化旨在综合算力、网络与能源资源的动态特性,优化任务分配与调度策略,在满足多样化业务需求的同时,降低系统能耗与碳排放,确保高效性、安全性和可持续性。

算网能一体化方案设计应遵循下述原则。

1) 绿色低碳与能效优化。作为核心目标,该原则强调通过动态调度算力节点、优化网络链路以及优先选择可再生能源供给,实现能耗与碳排放的最小化。系统需综合考虑能源供给结构(可再生能源占比等)和实时碳足迹,确保运行过程符合可持续发展的要求。

2) 智能化与动态适配。为应对复杂多变的任务需求与能源供给状况,算网能一体化系统应依托人工智能技术构建智能决策平台,集成机器学习与深度学习等算法,实现资源调度的预测性优化与动态调整,提升系统运行效率与自适应能力。

3) 安全性与数据驱动。在算力、网络和能源资源统一调度的背景下,安全性是系统可靠运行的重要保障。系统需建立多层次的安全防护机制,强化跨域协同能力,以有效抵御动态环境下的潜在威胁。同时,数据驱动的设计理念贯穿始终,系统需具备多源异构数据的整合与分析能力,为资源调度和业务决策提供科学依据。

### 3.2 功能架构

#### 3.2.1 架构描述

为了充分体现绿色低碳算网服务的核心理念和目标,本文在现有低碳算力网络总体架构<sup>[23]</sup>的基础上,创新地提出了算网能一体化功能架构。如图2所示,主要分为六层二面:基础设施层、感知层、模型层、智脑层、控制层、应用服务层、安全面和数据面。

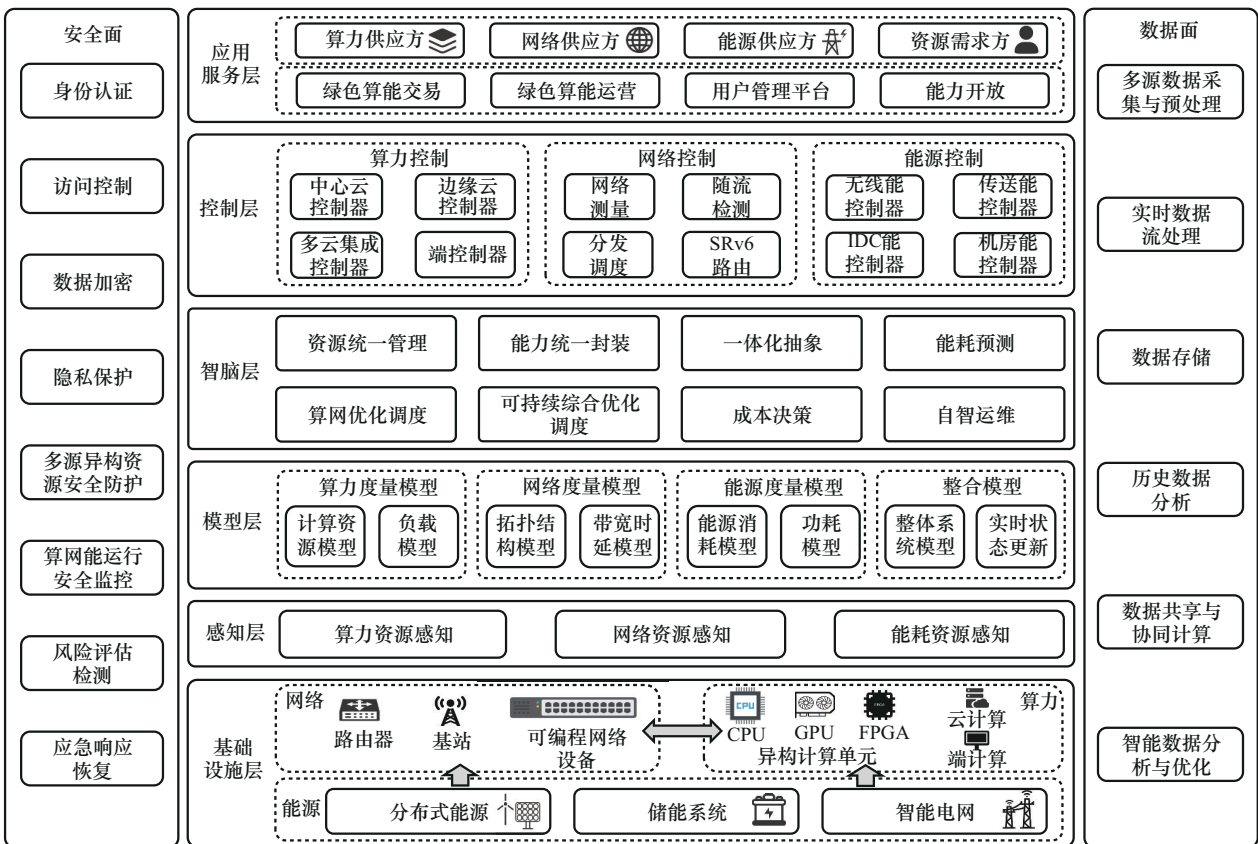


图2 算网能一体化功能架构

1) 基础设施层。基础设施层作为系统基石, 主要包含算力基础设施, 如中央处理器 (CPU, central processing unit)、图形处理器 (GPU, graphics processing unit)、现场可编程门阵列 (FPGA, field-programmable gate array) 等异构计算单元、网络基础设施 (包括路由器、基站等) 以及能源基础设施 (涵盖分布式能源、储能系统、智能电网等)。该层通过硬件资源虚拟化和统一编排技术, 实现计算、网络和能源资源的池化, 为感知层提供稳定可靠的基础支撑。

2) 感知层。感知层主要包括算力资源感知、网络资源感知和能耗资源感知, 采集计算节点的负载和性能指标, 监控网络拓扑、链路状态、带宽利用率及流量分布, 测量各设备的实时能耗, 分析能源使用效率等。通过多维度的数据采集和分析, 感知层为后续的资源优化和调度提供准确的输入。

3) 模型层。模型层是对底层物理基础设施资源进行度量建模, 包括算力、网络和能源的建模和分析。定义计算能力的量化指标, 并构建计算资源与负载模型; 评估网络质量 (时延、丢包率等) 和带宽利用率, 构建拓扑结构模型; 分析能源消耗模式, 建立功耗模型与能源消耗模型; 综合考虑算力、网络和能源的相互关系, 构建统一资源优化模型。

4) 智脑层。智脑层作为中枢, 负责资源管理、预测、调度、运维等多项功能, 具体来说通过资源统一管理模块实现异构资源的管理, 采用标准化接口对计算、存储、网络等能力进行统一封装, 构建一体化抽象服务框架。能耗预测模块基于历史数据与机器学习算法, 对系统能源消耗进行精准的预测分析; 算网优化调度模块结合任务需求与资源状态, 通过多目标优化算法实现计算与网络资源的协同分配, 在此基础上进一步引入可再生能源比例、碳排放因子等因素, 建立多维约束下的资源调度策略; 成本决策模块基于资源使用效率与经济成本, 动态调整资源分配方案以优化整体效益; 自智运维模块集成故障检测与修复机制, 实现系统的持续监控与智能维护。各模块协同工作, 确保系统在性能、能效与可持续性等维度达到最优状态。

5) 控制层。控制层包括算力控制、网络控制和能源控制, 根据任务需求动态调整计算资源配置; 优化路由选择、带宽分配和流量调度; 实施能源控制策略, 平衡能源供需。通过精细化的控制策

略, 确保系统运行的高效性和稳定性。

6) 应用服务层。应用服务层面向用户和业务需求, 提供多样化的服务支持, 具体包括搭建算力和能源交易平台, 支持资源的市场化配置, 并为用户提供个性化服务等。此外, 该层还协调算力、网络和能源供应方与资源需求方之间的交互, 促进资源的高效匹配。

7) 安全面。安全面保障整个架构的安全性和可靠性, 功能包括防止未授权访问; 对敏感数据进行加密存储和传输; 针对算力、网络和能源资源的特点, 设计针对性的安全防护策略等。该安全面通过多层次的安全防护措施, 保障系统的稳定运行。

8) 数据面。数据面负责管理和处理多源数据, 并向其他各层和安全面提供数据服务。具体包括采集各类数据, 并进行清洗和格式化; 分析和处理实时数据流, 支持动态决策; 分析历史数据中的规律和趋势, 为优化决策提供参考; 实现跨域数据共享和协同计算, 提升整体效率等。

算网能一体化功能架构相较于传统算力网络架构, 不仅关注算力与网络的协同优化, 更将能源要素纳入整体考量, 构建算力、网络和能源三位一体的融合体系。相较于现有低碳算力网络架构, 算网能一体化功能架构的优势体现在系统整合度与功能完备性上, 旨在实现三大要素的深度耦合与协同优化, 通过动态资源调配机制提升系统整体效能, 从而达成资源的最优配置与高效利用, 降低系统能耗与碳排放, 确保系统能够灵活应对能源供应的动态变化, 满足用户多样化的业务需求。同时, 通过多层次的安全保障机制, 确保系统的可靠性与稳定性。这种全方位的设计考量, 使算网能一体化功能架构在实现智能化、绿色化和安全化的数字基础设施方面具有一定的优势。

### 3.2.2 通信流程

算网能一体化功能架构信息流如图 3 所示。在算网能一体化功能架构中, 各层之间通过紧密的通信流程和标准化的跨层交互机制, 能够实现系统的协同工作和功能集成。以下是详细的通信流程, 并且针对跨层交互机制, 将主要分析智脑层和数据层相关的关键模块。

1) 基础设施层作为系统的物理基础, 承载了算力、网络和能源资源的供给。感知层通过实时监测这些资源状态 (如计算负载、网络带宽利用率、

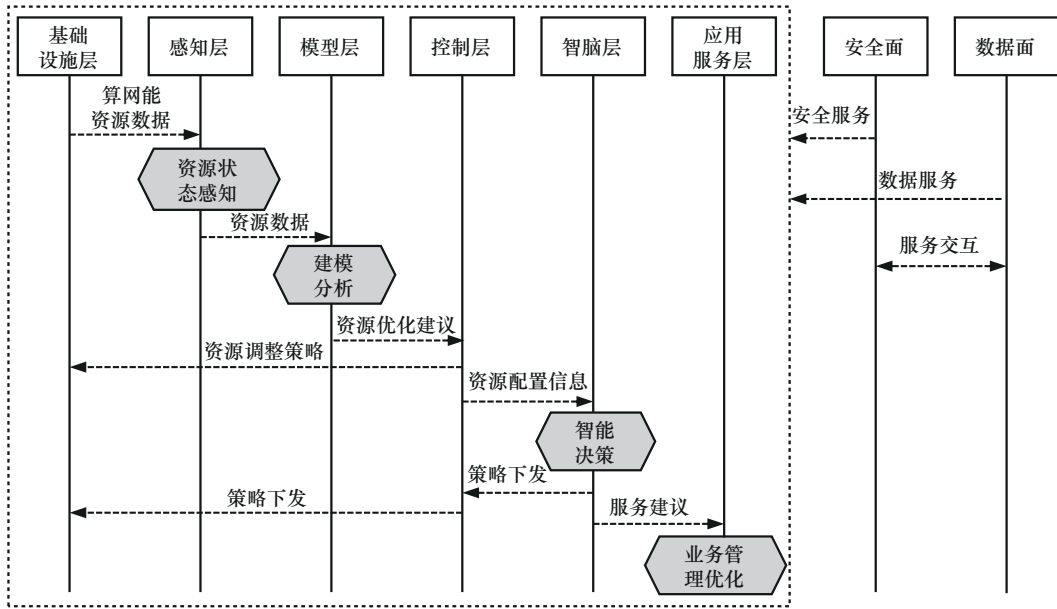


图3 算网能一体化功能架构信息流

能源消耗等), 构建对系统运行环境的全面感知。这种动态数据流动是跨层交互的基础, 为后续建模和决策提供了关键输入。为了实现高效的跨层交互, 感知层采用多维度的数据采集技术, 并通过标准化接口与基础设施层进行数据交换, 确保数据的准确性和及时性。

2) 感知层获取的资源状态数据被传递至模型层, 用于构建算力、网络和能源的综合模型。这种数据驱动的建模方法不仅能够提升模型的准确性, 还能增强系统对复杂场景的适应能力。为了支持跨层交互, 模型层定义了统一的数据格式和建模规范, 确保感知层提供的数据能够无缝对接到模型构建过程中。

3) 模型层向控制层提供基于建模分析的资源优化建议, 用于制定具体的资源配置和调整策略。同时智脑层也会向控制层传递决策结果, 控制层扮演“决策执行者”的角色, 将资源优化建议和决策结果转化为可操作的指令, 并传达到基础设施层。为了实现高效的跨层交互, 控制层采用了模块化的指令生成机制, 确保资源优化建议能够快速转化为针对不同资源的具体配置指令, 并通过标准化接口与基础设施层进行交互。

4) 控制层将资源配置信息和调整的实际效果反馈至智脑层, 为更高层次的智能决策提供支持。智脑层通过分析能够挖掘出系统运行的长期趋势和潜在优化空间。例如, 智脑层可以通过机器学习算

法预测未来的资源需求, 从而提前制定应对方案, 并向控制层下发策略。跨层交互的关键在于控制层提供的反馈数据的准确性和完整性, 以及智脑层的智能化分析能力。为此, 智脑层构建了资源统一管理、能力统一封装和一体化抽象模块, 其中资源统一管理模块通过标准化接口与基础设施层对接, 获取池化后的计算、网络和能源资源信息, 并将这些异构资源信息整合为统一的资源池, 支撑跨层资源调度与优化决策; 能力统一封装模块则对底层硬件资源的功能进行封装, 形成标准化的服务接口, 确保各层之间的交互具有清晰的逻辑边界; 一体化抽象模块在此基础上进一步构建了统一的服务框架, 整合了资源管理、任务调度和能耗优化等功能, 为应用服务层提供灵活的服务建议, 协调控制层和基础设施层的具体执行操作, 从而实现从底层资源到上层应用的无缝衔接, 有效提升了系统的整体协同性和运行效率。

5) 智脑层的智能决策服务于应用服务层, 为各类业务场景提供服务建议和支持。例如, 在绿色算能交易场景中, 智脑层可以根据能源价格波动等, 推荐最优的服务交易方案。为了实现这一目标, 智脑层通过标准化的服务接口与应用服务层进行交互, 确保智能决策直接应用于实际业务场景。

6) 安全面和数据面提供全局性的保障。安全面通过身份认证、访问控制和风险评估检测等手段, 确保各层之间的通信安全; 数据面则通过数据

采集、存储和处理,为系统运行提供可靠的数据支持。例如,当感知层向模型层传输敏感数据时,安全面会对其进行加密处理,防止数据泄露;数据面则通过分布式存储和数据冗余技术,确保数据的高可用性和一致性。为了支持跨层交互,安全面和数据面设计了多层次的安全防护措施和灵活的数据共享机制,确保各层之间的数据交换既安全又高效。

### 3.3 使能技术

本节对面向绿色计算的算网能一体化功能架构中的几种关键使能技术展开讨论,包括多维资源协同模型、动态实时决策、能效性能权衡和全生命周期管理。

#### 3.3.1 多维资源协同模型

通过综合考虑算力、网络和能源资源在时间和空间维度上的动态特性,建立统一的资源协同模型。该模型旨在准确刻画各类资源间的相互作用关系的同时,也可反映资源状态随时间演化的趋势特征,从而为后续优化调度提供坚实的理论基础和可靠的决策依据。

#### 3.3.2 动态实时决策

利用在线学习算法处理实时采集的多源数据,实现对系统状态的快速感知与响应。通过持续更新模型参数,确保决策过程能够适应环境变化,提升系统的自适应能力。同时,在线学习算法可有效应对突发任务需求和能源供给波动,保障系统的稳定运行和服务质量。

#### 3.3.3 能效性能权衡

采用多目标优化方法,在系统性能与能耗之间寻求最佳平衡点。通过帕瑞托最优解集分析,为不同应用场景提供灵活的资源配置方案。这种方法可在满足业务需求的前提下,最大限度地降低系统能耗和碳排放,实现绿色低碳的可持续发展目标。

#### 3.3.4 全生命周期管理

运用数字孪生技术构建系统的虚拟映射,实现从规划、运行到维护的全生命周期管理。通过虚实交互与持续优化,不仅可以提前预测潜在问题并采取预防措施,还能根据实际运行数据不断调整优化策略,从而提高系统的整体效能和长期稳定性。

## 4 算网能一体化研究关键问题

算网能一体化研究目前处于初步探索阶段,研究过程中也存在着一些关键问题。本节将从度量、

感知、交易和调度 4 个方面对算网能一体化研究展开讨论分析。

### 4.1 算网能一体化度量

本节首先对算网能一体化系统中涉及的主要度量对象进行分类,概述相应的研究现状,然后讨论分析目前算网能一体化研究在度量方面的问题及未来研究方向。

一体化度量是算网能研究的一个重要问题。算网能一体化度量是实现算网域与能源域信息匹配的关键环节。在这一环节中,算网任务作为连接算力需求与能源需求的核心桥梁,起着承上启下的关键作用。具体而言,算力资源的度量基于业务场景、服务类型及对应的任务负载,量化本次任务所需的算力资源(单位为每秒浮点运算次数),该过程主要发生在从用户需求到算网资源的映射阶段。网络资源的度量则聚焦于节点对外交互过程中的网络速率评估,以网络带宽为主要指标(单位为比特每秒),确定本次任务对网络资源的需求。在此基础上,能源度量在第二阶段展开,通过将第一阶段输出的算力与网络资源需求作为输入,进一步量化本次服务算力节点和网络所需的能耗资源。算力资源度量以幂回归模型为数学机理,结合神经网络模型,解析任务特征对算力资源的需求。针对网络资源模型构建,考虑网络资源服务波动性对服务能耗的影响,度量模型可表示为多元回归模型,并基于神经网络拟合模型,解析任务特征对网络资源的需求。能源度量以多元回归模型为数学机理,结合神经网络模型,解析任务特征对能耗资源的需求。如图 4 所示,算网能一体化综合度量模型通过精确的多层次映射关系解析算网任务对算网与能耗资源的需求,实现对任务资源需求的精准量化。

围绕算网能一体化度量,这方面的综合度量研究工作还很少,算网与能源之间解析的耦合性较差,而且不存在层级式度量的方案。但是目前已有的一些研究对算网的度量与建模方案进行了探索,包括四面三级算力度量技术体系<sup>[29]</sup>、混合式算力资源度量方法<sup>[30]</sup>、基于最小任务单元的算力建模与度量方法<sup>[31]</sup>,以及以服务为中心的算力网络度量与建模方案<sup>[32]</sup>等。随着计算需求的增加,如何在保证算力高效供给的同时降低能耗,成为当前研究的重点。数据中心作为算网基础设施能耗的重要组成部分,针对数据中心的负荷能耗建模已有一定的

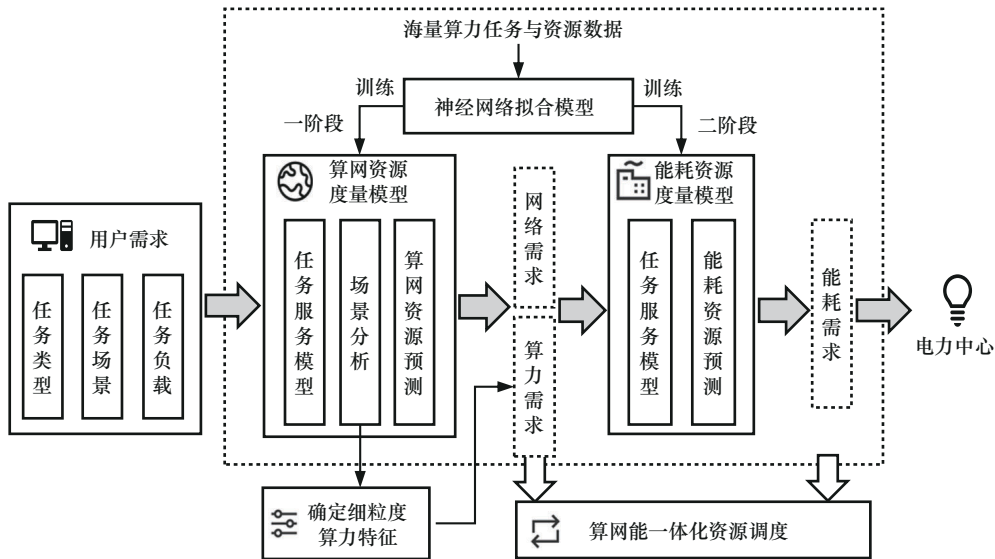


图4 算网能一体化综合度量模型

研究。数据中心的负荷可分为三大部分：信息技术 (IT, information technology) 设备 (如服务器)、制冷系统和配电系统。其中，IT 设备的负荷占比最高，通常在整个数据中心的能耗中占 50% 以上，而制冷系统和配电系统的负荷则分别占 40% 和 10%。对于 IT 设备能耗的建模方式已有多种研究总结，包括加性模型、基线负载模型、回归模型、幂函数模型和多项式模型等<sup>[33]</sup>。制冷系统的功率消耗主要受制冷策略、天气条件和 IT 设备功率的影响。传统的制冷功率模型假设数据中心产生的热量与消耗的电能呈线性关系，将制冷系统的功率视为 IT 设备功率的线性函数<sup>[34]</sup>，然而，这类模型未能充分考虑制冷方式和天气因素，存在一定的简化。为了提高准确性，较新的模型采用热力学理论和能效比等方法来描述制冷系统的能耗，更全面地反映了制冷策略和天气条件的影响<sup>[35]</sup>。上述关于算力网络度量的相关研究以及数据中心负荷能耗建模等工作，在一定程度上能够为算网能一体化度量研究提供支撑。不可否认，在数据中心负荷能耗建模领域已取得了一些阶段性研究成果。然而，需要指出的是，这些成果并不完全等同于算网能一体化度量中的能源度量环节，与算网能一体化度量存在差距。

现有的度量模型主要关注算网节点和设施的服务能力，缺乏对用户具体算力需求的深入分析，难以构建任务需求与算网能资源之间的量化评估体系。尤其是当今的应用场景愈加复杂，用户需求的

异质性加大了对多类型算力基础设施的调用频率，而不同基础设施的能耗特征也存在显著差异。因此，未来的发展方向需要在度量模型中进一步丰富算力需求的细粒度特征，包括任务的负载类型、实时性要求、资源消耗模式等，以形成多维度、动态化的算网能资源度量指标体系。同时，在模型结构上，引入基于任务需求特征的“任务-算网”和“算网-能源”双层映射机制，以任务需求特征为核心，建立资源与能耗的量化度量机制。该机制首先通过多维特征空间（包括负载类型、实时性要求和资源消耗模式）对算力任务进行精细化建模。随后在“任务-算网”层采用特征相似度匹配算法实现需求与资源的动态映射，并在“算网-能源”层建立设备级能耗模型量化资源使用与能耗的关系。最后通过双层协同优化机制实现动态反馈调整。为复杂场景下用户对算力和能效的双重需求提供科学的度量依据，从而为高效的算网能资源管理和调度奠定坚实的基础。

#### 4.2 算网能一体化感知

本节首先对感知研究现状进行概述，如表 1 所示。然后讨论分析目前算网能一体化研究在感知方面的问题及未来可能的研究方向。

算网能一体化感知的核心是通过获取算网和能源数据，构建统一的算网能资源信息库，实现跨域资源在时间尺度上的匹配，同时支持未来资源预测，从而为资源优化调度奠定基础。与传统算力网络聚焦于算力状态精确感知和网络资源细粒度实时

表 1 感知研究现状总结归纳

场景	文献	方法	局限性
算力资源感知	文献[3]	采用计算图实现算力资源感知和任务调度	依赖信息中心网络架构的普及度与兼容性
	文献[36]	扩展 BGP 路由协议, 在数据包中携带算力节点的服务状态信息	增加协议复杂性及网络负担
	文献[37]	算力服务感知协议与流程交互	依赖边云协同基础设施
网络资源感知	文献[38-42]	主动网络测量: ping、Traceroute、TWAMP 等	增加带宽负担, 可能并不反映真实网络状态
		被动网络测量: sFlow、NetFlow、IPFIX、PSAMP 等方案和协议	信息范围有限, 需依赖现有流量
	文献[43]	网络遥测	可能增加带宽负担
	文献[44]	带内网络遥测	需适配多网络设备
	文献[45]	IOAM	网络设备需支持 IOAM 标准
算网资源一体化感知	文献[46]	算力感知网络, 引入感知平面收集、管理并综合算网信息	信息维度较高, 处理开销较大
能源状态感知	文献[47]	面向高比例新能源渗透的配电网电压时空分布感知方法	需数据充足
	文献[48]	针对新一代电力系统的自适应动态估计方法	依赖性能指数和阈值设置
	文献[49]	基于耦合消元准则的综合能源系统非侵入式源荷设备状态联合感知方法	复杂度较高

监测不同, 算网能一体化的研究重点在于突破单一资源维度, 建立算力、网络和能源的联合感知机制。同时关注长周期能源供给(如风光发电波动)与短周期算网需求的动态匹配, 设计兼顾实时性与预测性的混合感知框架。目前针对算力和网络资源的独立感知已有多项研究, 但面向三者协同的一体化感知仍存在挑战。

算力资源感知。Król 等<sup>[3]</sup>提出了基于信息中心网络的算力网络融合架构, 通过计算图实现算力资源感知和任务调度。曹畅等<sup>[36]</sup>建议扩展边界网关协议(BGP, border gateway protocol), 在数据包中携带算力节点的服务状态信息, 使网络实时感知算力节点的信息。中国移动提出了一种算力服务感知协议与流程交互<sup>[37]</sup>。

网络资源感知。在算力网络中, 及时掌握网络资源的状态需通过网络测量, 根据 RFC7799 分为主动、被动和混合网络测量 3 类。混合网络测量融合前两者的优势, 优化测量策略实现协同监测。主动网络测量利用专门数据包(如 ping、Traceroute、TWAMP<sup>[38]</sup>等)进行测量, 特点是灵活但可能增加带宽负担, 且结果可能不反映真实网络资源状态。被动网络测量通过分析现有流量(采用 sFlow<sup>[39]</sup>、NetFlow<sup>[40]</sup>、IPFIX<sup>[41]</sup>、PSAMP<sup>[42]</sup>等方案和协议)

进行测量, 无额外数据包生成, 但信息范围有限。软件定义网络与 P4 技术推动网络测量进化, 使网络遥测<sup>[43]</sup>技术成为趋势。其中, 带内网络遥测(INT, in-band network telemetry)<sup>[44]</sup>和带内操作管理和维护(IOAM, in-band operation, administration and maintenance)技术表现突出, INT 通过特定数据包收集网络信息, 同时有多种模式。IOAM 在数据包中加入操作管理和维护(OAM, operation, administration and maintenance)数据, 由网络设备搜集信息, 从而实现网络状态的高效监控<sup>[45]</sup>。

对于算网资源一体化感知, 文献[46]设计了算力感知网络的系统架构, 在其中引入感知平面来收集、管理并综合算网信息。然而构建绿色低碳的算力网络不仅需要算力和网络资源的感知, 还需要能源状态感知。文献[47]提出了一种面向高比例新能源渗透的配电网电压时空分布感知方法, 通过数据驱动的方法实现在缺乏配电网潮流模型条件下的短期、高精度的节点电压感知预测。为了监测有功配电网的运行情况, 文献[48]提出了一种针对新一代电力系统的自适应动态估计方法, 结果表明该方法在面对复杂配电网时收敛速度更快, 精度保持较好。文献[49]提出了基于耦合消元准则的综合能源系统非侵入式源荷设备状态联合感知方法, 能够以

“非侵入”的方式联合感知多能源设备的运行状态，精细化辨识园区综合能源系统内部主体设备的（等效）功率。上述关于算力、网络资源感知和算网资源一体化感知的相关研究以及能源状态感知等工作，在一定程度上能够为算网能一体化感知研究提供支撑。

算网能一体化感知技术要求系统能够对算力、网络和能源三者实现高精度、实时性的信息采集与监控，以此动态满足业务需求并优化资源分配。然而现阶段，算力、网络和能源资源感知在标准、精度与时效性方面存在差异，难以支持能源优化与系统整体管理。为解决这些问题，未来需要构建具备统一标准的实时算网能资源感知框架，如图 5 所示，进而扩展算网能一体化感知的深度与广度。具体而言，在算力资源感知方面，基于智能平台管理接口与 Prometheus 等监控系统，结合云服务商资源监控应用程序编程接口（API, application programming interface），以细粒度获取 CPU 利用率、GPU 性能、存储输入/输出等多层次指标，从而支持异构算力的全方位信息感知。网络资源感知依托 API 与网络控制器集成，通过引入软件定义广域网络（SD-WAN, software-defined networking in a wide area network）控制器和网络状态探测工具采集链路状态、时延、丢包率等关键网络参数，同时进一步监测客户终端设备的实时性能表现，确保网络状态的动态可视化。能源状态感知侧重于对能源节点的细致监测，利用智能电表等传感设备实时区分和跟踪可再生与非可再生能源的供给比例，并分析电压

稳定性和功率因数，保障能源的持续稳定供应。通过这 3 个维度的资源数据感知，构建统一的算网能信息库，支持未来一段时间内的资源预测需求，实现算网和能源在时间尺度上的资源匹配。如何协同算网能资源的一体化感知，也是研究的重点。这需要算网能系统持续全面监测算力、网络及能耗资源信息，通过网络节点感知固定用户和移动用户的网络资源需求与可用量，对算力资源进行实时监测评估，同时系统对能源供应企业的绿电（可再生能源）与非绿电供应进行细致感知。最终致力于实现算网资源服务与能源供应的有效耦合，同时在分配算力资源时兼顾用户需求与能源实时供应，提升系统的整体资源利用效率和服务质量，减少对非可再生能源的依赖，助力可持续发展。

### 4.3 算网能一体化交易

本节首先概述算网和能源交易的研究现状，如表 2 所示。然后讨论分析目前算网能一体化研究在交易方面的问题及未来可能的研究方向。

围绕算网能一体化交易开展了以下的工作，算网交易激励机制旨在激励算网供应方高效贡献其服务资源。目前已经有大量关于算网交易方面的研究，文献[50]提出了一种基于区块链技术的算力网络资源交易框架，旨在为分布式物联网云服务提供公平可靠的交易系统。该框架结合去中心化的声誉系统和增强型共识机制，以确保高质量的服务并激励节点提供可靠计算资源。文献[51]提出了一种基于非同质化代币（NFT, non-fungible token）的分布式拍卖机制，用于算力网络中的多资源交易。

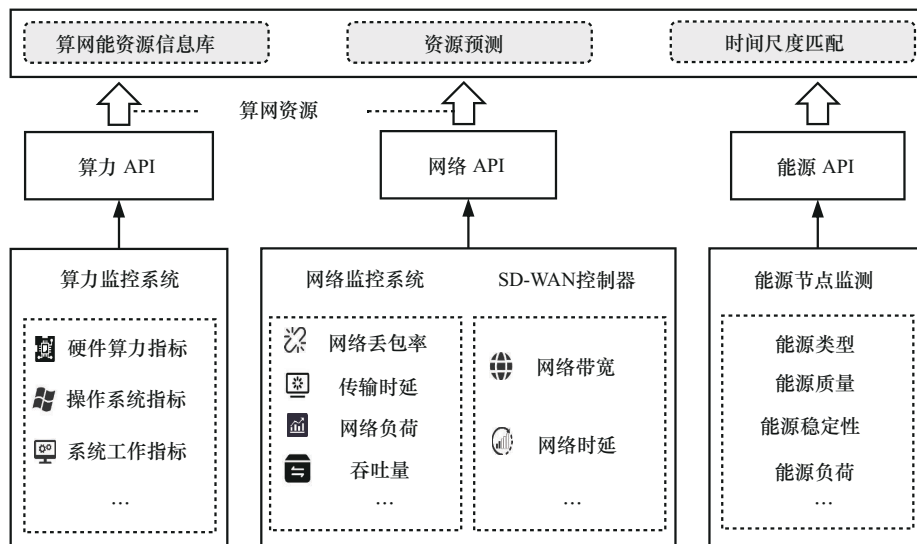


图 5 算网能资源感知框架

表2 算网和能源交易研究现状总结归纳

场景	文献	方案	技术方法
算网交易	文献[50]	引入了提高信誉的资源交易框架；建立了分散的声誉模型和声誉增强的共识机制	区块链
	文献[51]	基于 NFT 的分布式拍卖机制	NFT、区块链
	文献[52]	基于 Stackelberg 博弈和拍卖理论的三层联合优化框架	Stackelberg 博弈、拍卖理论
	文献[53]	基于合约理论的信任驱动资源交易激励机制	区块链、合约理论
能源交易	文献[54]	基于算力网络的能源交易系统架构；引入合约理论和声誉评估模型	区块链、合约理论
	文献[55]	P2P 电力市场的异步在线协商机制	异步在线共识 ADMM 算法
	文献[56]	基于博弈论的分布式 P2P 能源交易机制	博弈论
	文献[57]	P2P 能源交易机制	博弈论、混合整数线性规划

文献[52]提出了一种基于 Stackelberg 博弈和拍卖理论的三层联合优化框架，旨在增强算力网络中资源交易的积极性。文献[53]提出了一种基于合约理论的信任驱动资源交易激励机制，解决算力网络中资源交易面临的信任和效率问题。通过设计信任保障方案和激励机制，一定程度上能够确保资源交易的可靠性和高效性。

能源交易激励主要关注可再生能源消纳的交易研究，以及可再生能源与电力市场之间的关联性研究等。随着国家“双碳”战略目标的确定，可再生能源消纳问题受到了广泛关注。文献[54]提出了一种基于算力网络的能源交易系统架构，为生成式人工智能服务提供分散的按需可再生能源。文献[55]提出了一种适用于实时点对点（P2P, peer to peer）电力市场的异步在线协商机制，所有代理可自由交易。文献[56]研究了基于博弈论的分布式 P2P 能源交易机制，模拟了市场协调过程中不同参与者之间的动态互动。文献[57]提出了一种新的 P2P 能源交易机制，通过结合博弈论和混合整数线性规划的优化方法来解决 P2P 能源交易过程中的市场结算和网络约束问题。

目前算力网络资源和能源交易的研究取得了一定的阶段性成果，能够为算网能一体化交易研究提供支撑，但在研究过程中仍存在一些挑战，如算网资源的异构性及能源供给的时空波动性不仅会降低交易效率，还容易削弱参与意愿，难以达成绿色计算的目标。因此，如何实现绿色高效的算网能资源交易成为研究的重点。

图6展示了算网能资源交易模型整体架构，该架构由用户、算网资源交易供应方、能源电网以及交易平台等核心主体构成。在用户与算网资源交易

供应方之间，采用了去中心化的交易模式。用户在该交易模式中主要关注服务质量，而对服务完成过程中所消耗的能源类型并不在意。算网资源交易供应方则与能源电网之间通过 P2P 能源交易机制进行能源交易。为了实现碳中和的目标，算网资源交易供应方对绿色计算有着迫切需求，这要求能源供应方提供一定比例的绿色电力。由于绿色电力的成本相对较高，算网资源交易供应方的服务成本随之增加，进而对服务定价产生影响。在传统的分布式交易架构中，节点通过平台完成资源交易与激励，但随着 P2P 能源交易机制的引入，算网能资源交易需综合考虑能源的动态供给特性，并通过分级激励来平衡多方利益。

然而，算网交易与微电网交易系统的动态特性使资源配置与能源供给的定价需适应变化的市场需求，传统的静态定价机制难以有效应对。在算网能多方交易模型中，能源交易的效率受能源种类及其碳排放质量的显著影响，能源供应节点与用户的需求存在较大差异，尤其是企业用户对低碳能源的需求在不同场景下差异明显，但目前能源质量与碳排放系数尚未统一。为解决上述问题，未来的研究方向包括：1) 深入分析算网资源交易供应方、用户与能源供应方三者之间的交易关系，构建多方可信交易激励机制和效用优化模型；2) 在动态场景下，实现服务需求与算网资源及低碳能源的灵活匹配，开发动态定价策略，并设计高效的资源度量模型，实现实时定价和业务调整；3) 基于企业用户的低碳能源需求差异，优化 P2P 能源交易机制，以促进微电网之间资源的高效共享。

#### 4.4 算网能一体化调度

本节首先对算网调度研究现状进行概述，如表3

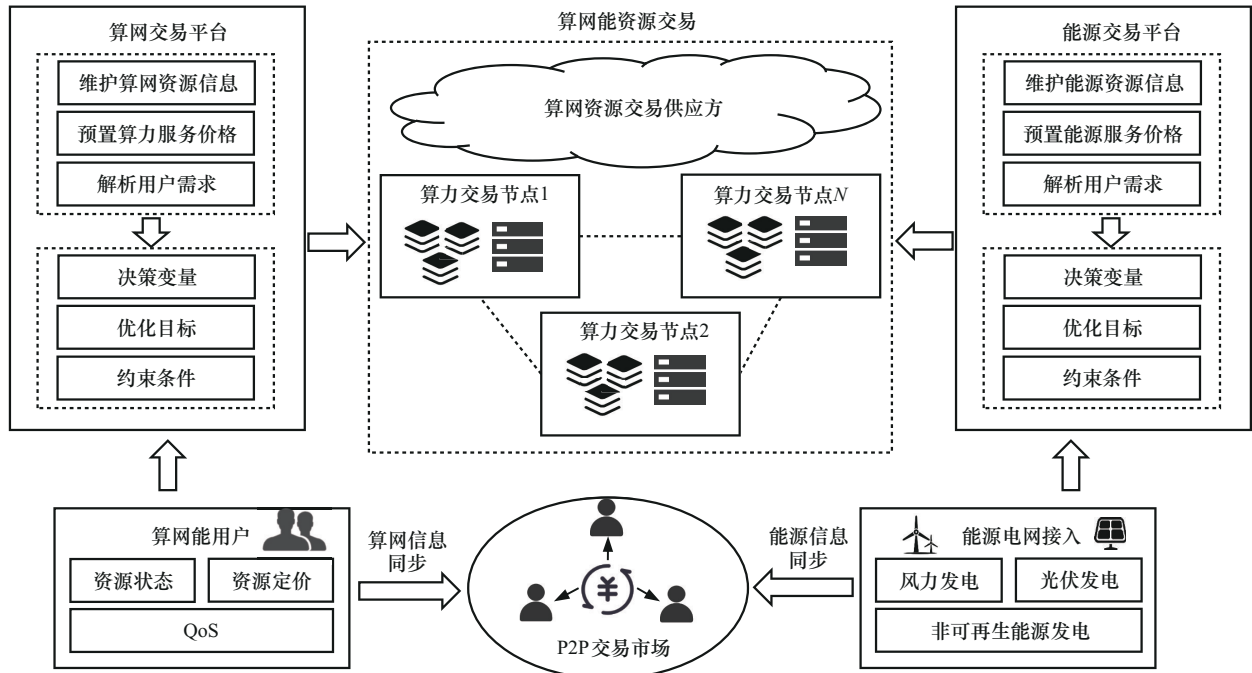


图6 算网能资源交易模型整体架构

表 3 算网调度研究现状总结归纳

场景	优化目标	文献	方案	技术方法
边缘算力网络	时延和成本	文献[58]	用于边缘算力网络中任务卸载的按需计算资源调度模型	两阶段进化搜索方案
算力网络	时延和可靠性	文献[59]	基于约束马尔可夫决策过程的时延优先任务调度系统	Lyapunov 优化的深度强化学习算法
		文献[60]	时延优先和可靠的调度策略	开发一个专门的智能代理, 集成任务调度策略以及路由路径和算力节点的协同选择
	时延	文献[61]	综合考虑了算力网络中的网络环境、计算资源以及 workflow 任务的拓扑信息	基于势博弈的分布式 workflow 卸载算法、基于动态资源权重的启发式 workflow 卸载算法
卫星边缘计算网络	意图与资源最优匹配	文献[62]	服务意图感知任务调度框架	基于双重 Vickrey 拍卖的意图匹配算法
云计算系统	能耗、负载均衡和丢包率	文献[63]	在小时间尺度上建立任务调度模型, 建模为约束马尔可夫决策过程	Lyapunov 技术和软演员-评论家深度强化学习框架学习静态调度策略。
绿色算力网络	利润、空闲能耗成本、碳排放成本、作业迁移和结果检索的数据传输成本	文献[64]	在全球云计算网络中进行作业调度	一种收入、成本和碳敏感的作业调度算法
	时延、能耗和匹配程度	文献[65]	在绿色算力网络中设计了一种基于广泛注意力的细粒度任务卸载方法	一种新颖的广义注意力强化学习方法

所示。然后讨论分析目前算网能一体化研究在调度方面的问题及未来可能的研究方向。

算网调度基于网络和算力信息选择网络路径, 已有大量研究关注其低时延传输需求。文献[58]研究了一种新的边缘算力网络场景, 设计了一种按需计算资源调度模型, 旨在通过弹性整合和灵活调度

计算资源来提升任务卸载效率。文献[59]研究了算力网络中深度融合计算与网络资源的任务调度问题, 提出了一个基于约束马尔可夫决策过程的时延优先任务调度系统。在文献[59]的基础上, 文献[60]研究了算力网络内路由路径和计算节点联合选择问题, 设计了一种时延优先和可靠的调度策略。文

献[61]研究了算力网络环境下 workflow 任务卸载与资源分配问题，提出了 2 种针对不同类型 workflow 任务的优化算法。文献[62]提出了一种服务意图感知任务调度框架，旨在实现服务意图与网络资源的最优匹配。文献[63]提出了一种双时间尺度框架，用于优化卫星边缘计算网络中的服务部署和任务调度，在小时间尺度上建立任务调度模型，最小化能耗、负载不平衡和丢包率。

随着算力网络的发展，能源消耗呈爆炸式增长，需要更加有效地降低能耗和碳排放，构建绿色低碳的算力网络。文献[64]提出了在全球云计算网络中进行作业调度以提高计算可持续性，解决地理分布式云数据中心之间计算需求和低成本清洁能源可用性的不平衡。并且设计了一种收入、成本和碳敏感的作业调度算法，使用实际工作负载、能源价格和碳强度数据集评估所提算法的性能。文献[65]在绿色算力网络中设计了一种基于广泛注意力的细粒度任务卸载方法，建立了绿色算力网络的细粒度有向无环图相关子任务卸载问题，设计了一种新颖的广义注意元强化学习方法，关注主要的信息以减少任务的时延和能量消耗。

当前调度算法主要聚焦于资源利用率和性能优化，而对能源消耗的时空特性缺乏充分考量，导致系统在应对能源动态变化时难以实现低碳调度目标。在算网能一体化系统中，需求与能源供应呈现出快速波动特征，传统调度机制受限于实时优化能力，难以灵活适应动态变化的供需情境。因此，为实现绿色低碳的任务调度，亟须基于能源特性设计

协同调度机制。图 7 展示了算网能一体化系统资源调度的示意图，其中算网能调度平台依据用户的服务需求以及算力、网络和能源 3 种资源的状态信息，通过合理分配算网资源对任务进行处理，以实现绿色计算的目标。然而，当前研究仍面临诸多问题与挑战。传统调度机制多采用静态资源调整方式，未能充分考虑能源与负荷需求的时空不确定性，导致其难以适配多样化的用户需求，无法实现源-荷实时匹配与绿色计算。未来研究可聚焦于以下方向：1) 构建算网能综合优化调度框架，增强系统的协同调度能力，并通过分析典型场景下的调度性能提升系统的适应性；2) 优化算力、网络与能源的协同调度，以实现绿色低碳计算，特别是针对高负荷场景下的低碳调度策略。

### 5 应用场景分析

本节将从人工智能、消费互联网和产业互联网 3 个重要领域出发，选取包括大模型、元宇宙、物联网和智能制造在内的 4 个典型的应用场景和其他 3 个应用场景，详细探讨算网能一体化在这些场景中的应用价值。

#### 5.1 大模型

大模型的训练和推理过程对计算资源的需求极高，在训练阶段，大模型通常需要持续数周甚至数月的计算集群运算，电力消耗可达数百万千瓦时。算网能一体化通过动态资源调度优化训练能效，利用训练任务的容错性，在可再生能源出力高峰期集中执行高负载计算，而在能源供应紧张时降低计算

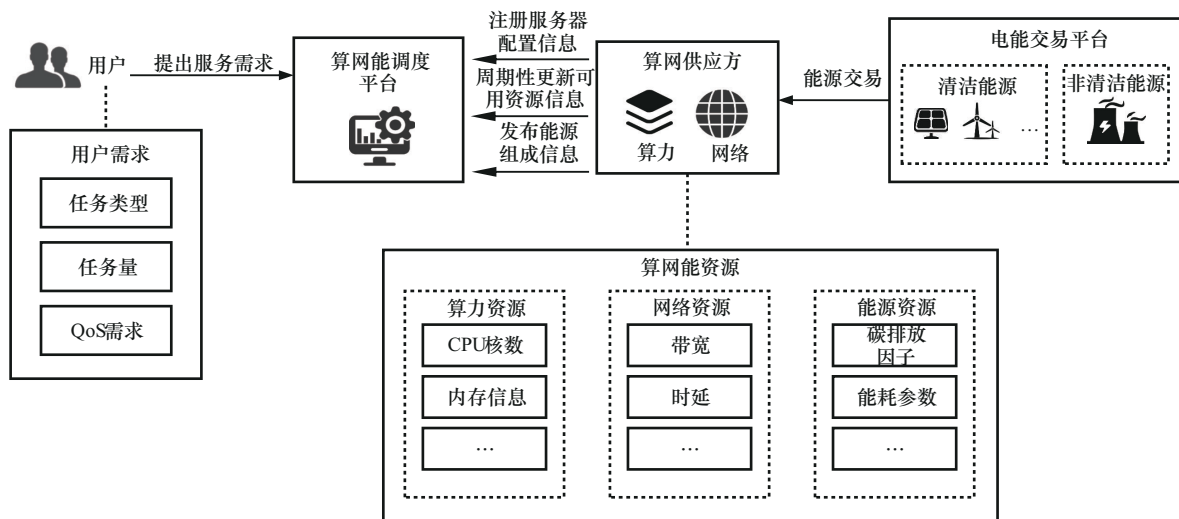


图 7 算网能一体化系统资源调度

频率或采用低精度训练模式。由于推理任务具有突发性和低时延要求,算网能一体化根据实时能源供应情况动态分配推理任务:在能源充足时,将计算负载迁移至边缘节点执行,减少长距离数据传输的能耗;在能源紧张时,则通过模型压缩和动态批处理技术降低计算需求。此外,结合用户地理位置和用电峰谷特征,优化模型部署策略,如在夜间谷电时段预加载模型参数,减少高峰期的即时计算压力。

## 5.2 元宇宙

元宇宙作为虚拟世界的代表,依赖于强大的计算能力和低时延的网络连接,以实现沉浸式用户体验。算网能一体化通过协同优化,提升能效并保障用户体验。在计算层面,根据用户视觉焦点调整算力分配,减少非关键区域的像素计算量,从而降低GPU功耗。同时,结合边缘节点的储能系统,在绿电供应充足时预计算部分渲染任务,缓解高峰期的计算压力。在网络层面,元宇宙的实时交互要求毫秒级时延。算网能一体化结合智能休眠唤醒策略,根据用户密度和移动轨迹预测基站负载,动态调整射频功率。例如,在低活跃度区域,基站可进入深度休眠状态,仅维持最低限度的信令连接。而在高并发场景下,则结合低能耗技术补充数据传输,优化数据搬移开销,进一步降低端到端通信能耗。

## 5.3 物联网

物联网的海量终端与能量受限特性使其成为算网能一体化的关键应用场景。算网能一体化通过通信-计算协同优化延长设备寿命:一方面,采用动态扩频技术,根据信道质量和节点剩余能量自适应调整通信速率,减少无效传输能耗;另一方面,通过边缘计算卸载,将复杂的数据处理任务迁移至能源供应稳定的边缘节点,降低终端设备的计算负担。在能源管理方面,算网能一体化实现网络-电网协同优化。物联网终端通常依赖电池或能量收集技术,其能源供应具有高度不确定性。算网能一体化通过状态感知的动态调度策略,在电压波动或能源短缺时降低非关键任务的优先级,确保核心功能持续运行,提高续航能力。

## 5.4 智能制造

智能制造涉及大量的数据采集、处理和分析,需要强大的计算能力支持。算网能一体化通过动态

任务调度匹配能源供应,在电价低谷或绿电充足时段集中执行高负载仿真计算,并将结果缓存用于后续工艺优化。同时,利用工业设备的再生能源(如机械臂制动能量、冲压机液压蓄能)为边缘计算节点供电,形成局部能源微循环。在质量控制环节,算网能一体化结合自适应检测策略降低能耗,在能源供应不稳定时自动降低检测频率,仅对关键工位保持全时监控。基于强化学习的动态压缩技术能够优化工业相机的数据传输量,减少网络能耗。

## 5.5 其他场景

随着数字经济的快速发展,绿色数据中心、边缘计算和6G网络等新型数字基础设施不仅需要高效的计算与网络资源调度,还需深度优化能源使用模式,以实现低碳化、智能化的运营目标。

### 5.5.1 绿色数据中心

在绿色数据中心领域,算网能一体化通过动态负载均衡与能源协同管理,显著提升能效。例如,结合储能系统,在电价低谷时段存储能源,于用电高峰时段释放,有效降低运营成本。此外,通过智能预测可再生能源发电量,数据中心可主动将计算任务调度至绿电供应充沛时段,减少对传统电网的依赖。

### 5.5.2 边缘节点

在边缘计算场景下,算网能一体化的价值在于实现计算、网络与能源的本地化协同。边缘节点通常部署在靠近用户或数据源的区域,能源供给受限,因此需采用轻量化资源调度策略。例如,通过闲时储能技术,边缘节点可在能源充足时缓存电力,以应对突发计算需求。同时,结合任务卸载与计算迁移,优化边缘-云协同,降低端到端能耗。此外,边缘节点的分布式能源可被纳入整体调度体系,形成弹性供能网络。

### 5.5.3 6G融合网络

未来的6G融合网络不仅需要满足海量设备连接与极速数据传输,还需在能源效率上实现突破。算网能一体化可通过智能反射面、动态频谱共享等技术降低无线侧能耗。同时,基于网络功能虚拟化和算力感知路由,优化计算任务在网络中的分布,减少冗余传输。此外,6G基站可结合分布式能源与智能储能,实现能源自给与动态调度,进一步降低碳排放。

## 6 开放性问题与挑战

算网能一体化作为融合算力、网络和能源的新形式, 存在一些趋势性的开放问题和挑战需要进一步探讨, 具体总结如下。

### 6.1 架构与使能技术实现

在算网能一体化架构实现方面, 由于需集成算力、网络、能源等多个异构系统, 这些系统在技术架构、管理平台和运营模式上差异大。例如, 云计算数据中心、边缘计算节点和智能电网, 其数据格式、通信协议和安全机制各不相同, 建立统一标准和接口规范以达成无缝集成与高效协同困难重重。为实现资源高效利用, 需对硬件资源进行虚拟化和统一编排, 然而现有虚拟化技术在算力、网络和能源资源联合管理方面存在短板。跨域资源动态分配调度时保证性能不受影响、确保虚拟化资源安全隔离等问题亟待解决。

在使能技术实现方面, 作为核心的多维资源协同模型, 准确刻画各类资源复杂的相互作用关系并反映其在时空维度的动态特性存在难度, 模型的准确性和适应性需进一步提升以应对复杂多变的实际应用场景。在动态实时决策方面, 在线学习算法处理多源数据时面临数据质量参差不齐和计算复杂度高的问题, 且在应对极端环境变化时, 系统自适应能力的稳定性有待加强。在能效性能权衡上, 现有多目标优化方法存在局限, 满足业务需求降低能耗与碳排放、实现帕瑞托最优解动态调整及应对不同场景的能效权衡等问题尚需深入研究。在全生命周期管理方面, 数字孪生技术构建虚拟映射存在建模精度不足的问题, 虚实交互的实时性和可靠性有待增强, 难以精准预测和解决所有潜在问题。

#### 6.1.1 资源数据壁垒

数据已成为驱动数字经济发展基本要素, 数据既是算力网络的处理对象, 也是能源的主要服务对象, 然而能源网络与算力网络存在一定的资源和数据壁垒, 这是算网能一体化的最大挑战。未来需要促进数据共享与整合, 构建统一数据平台, 实现多源数据的统一管理与分析, 解决资源和数据壁垒问题。

#### 6.1.2 标准统一与兼容性

算力网络与能源系统在标准统一和兼容性方面的问题突出, 阻碍了跨领域协同。在技术协议上, 算力网络采用 TCP/IP、HTTP/3 等互联网协议, 能源

系统采用 IEC 61850、DNP3 等电力专用协议, 在实时性、安全性和数据包结构上二者有根本冲突。在数据格式方面, 算力侧的结构化或非结构化数据与能源系统的 SCADA 时序数据、CIM/XML 电网模型难以融合, 且无统一元数据映射规则。硬件接口不兼容, 算力设备智能网卡采用 PCIe/USB 标准, 电力终端采用 RS-485/PLC 接口, 增加转换成本。监管要求冲突, 算力网络依赖跨境数据流动, 能源系统受本地化存储限制, 安全认证体系未协同。

### 6.2 算电协同智能优化调度

算力网络与能源电力的协同调度需构建时空多维优化框架, 其核心在于融合分层优化机制与人工智能驱动的全局决策。在时间维度上, 建立长短期双向反馈闭环: 长期规划通过碳排放约束、容量配置等为短期调度设定边界条件, 而实时调度数据则反向修正长期预测模型的准确性。在空间维度上, 通过量化区域差异化的碳排因子、动态电价及网络时延成本, 构建多目标博弈模型, 激励数据中心基于绿电可用性实施跨域任务迁移。

该体系的智能实现依托多技术协同, 采用深度强化学习框架处理算力、网络和能源的复杂耦合关系, 其中算力侧应用联邦学习保障数据隐私, 网络侧引入图神经网络优化拓扑感知, 能源侧利用生成对抗网络模拟电力供需动态。针对跨域协同场景, 开发自适应优化算法以快速响应约束条件变化, 通过局部决策与全局目标的动态博弈实现优化调度。未来研究应重点关注算法可解释性、多时间尺度稳定性以及博弈均衡的收敛性验证, 从而形成兼具鲁棒性与适应性的算电协同智能调度范式。

### 6.3 算网能数字孪生

算网能数字孪生通过数字化和模拟仿真技术, 创建算力网络和能源系统的一体化虚拟模型, 实时反映系统现实状态, 支持优化管理和决策。如何通过高精度建模方法将异构算力网络与复杂能源系统映射到数字空间, 同时解决实时性与精度之间的权衡难题以支持动态决策。此外, 复杂交互关系的解析与建模也是一大挑战, 需要研究如何准确描述算力、网络和能源之间的非线性耦合特性。数据驱动与机理模型的融合为提升模型鲁棒性和泛化能力提供了新方向, 但其具体实现仍需深入探讨。

### 6.4 新型能源机制

新型能源机制的设计可从市场机制和技术架构

2个层面展开。在市场机制层面,构建基于区块链的分布式能源交易平台,通过智能合约实现算力需求与绿色能源供给的精准匹配,同时引入碳积分激励机制促进低碳算力资源的使用。在技术架构层面,构建具备能量感知、存储和调度能力的智能化节点,实现能源流与信息流的深度融合。此外,针对间歇性可再生能源接入带来的挑战,需要设计具备自适应能力的能量缓存机制,建立多层次储能系统形成弹性能源缓冲层,提升系统对能源波动的鲁棒性。未来研究应着重探索能源即服务模式在算网能一体化场景中的应用潜力,以及相应的定价策略和交易机制设计。

## 7 结束语

随着科技的日新月异与算力网络研究的日益深化,算力网络的能耗及碳排放量急剧上升,使能源问题在算力网络的发展进程中愈发凸显,不容忽视。因此,算力网络与能源的协同创新将成为未来研究的关键趋势。然而,当前业界在算网能一体化领域的探索尚处于初级阶段,网络架构、关键技术等诸多方面仍面临诸多亟待破解的难题。在国家“双碳”战略目标的引领下,以及人工智能、增强现实/虚拟现实、自动驾驶、全息通信等技术的不断进步,网络新业务与新应用对计算和网络资源的需求持续攀升,要求也愈发严苛,将会进一步推动计算和网络资源向绿色低碳化等方向发展,加快构建新型电力系统。未来,算网能一体化可能在信息网络变革与社会经济发展中扮演愈发重要的角色。

## 参考文献:

- [1] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3): 1628-1656.
- [2] TANG X Y, CAO C, WANG Y X, et al. Computing power network: the architecture of convergence of computing and networking towards 6G requirement[J]. *China Communications*, 2021, 18(2): 175-185.
- [3] KRÓL M, MASTORAKIS S, ORAN D, et al. Compute first networking: distributed computing meets ICN[C]//Proceedings of the 6th ACM Conference on Information-Centric Networking. New York: ACM Press, 2019: 67-77.
- [4] LEI B, ZHAO Q Y, MEI J. Computing power network: an interworking architecture of computing and network based on IP extension[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 22nd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [5] 国家发展改革委,中央网信办,工业和信息化部,等.全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案[R]. 2021. National Development and Reform Commission, Central Cyberspace Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Implementation plan of computing power hub of national integrated big data center collaborative innovation system[R]. 2021.
- [6] 中央网络安全和信息化委员会.“十四五”国家信息化规划[R]. 2021. Cyberspace Affairs Commission of the CPC Central Committee. The “14th five-year plan” for national informatization[R]. 2021.
- [7] 国务院.“十四五”数字经济发展规划[R]. 2022. The State Council. “14th five year plan” for digital economy development[R]. 2022.
- [8] 国务院.数字中国建设整体布局规划[R]. 2023. The State Council. Overall layout plan for digital China construction[R]. 2023.
- [9] The National Science and Technology Council (NSTC) Subcommittee on Future Advanced Computing Ecosystems. Pioneering the future advanced computing ecosystem: a strategic plan[R]. 2020.
- [10] The European Commission. 2030 digital compass: the European way for the digital decade[R]. 2021.
- [11] 李洁,王月.算力基础设施的现状、趋势和对策建议[J]. *信息技术与政策*, 2022(3): 2-6. LI J, WANG Y. The status, trends and suggestions of computing infrastructure[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2022(3): 2-6.
- [12] 工业和信息化部,中央网信办,教育部,等.算力基础设施高质量发展行动计划[R]. 2023. Ministry of Industry and Information Technology, Central Cyberspace Administration, Ministry of Education, et al. Computing infrastructure high-quality development action plan[R]. 2023.
- [13] 贾庆民,丁瑞,刘辉,等.算力网络研究进展综述[J]. *网络与信息安全学报*, 2021, 7(5): 1-12. JIA Q M, DING R, LIU H, et al. Survey on research progress for compute first networking[J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2021, 7(5): 1-12.
- [14] 中国移动.算力网络白皮书[R]. 2021. China Mobile. Computing force network white paper[R]. 2021.
- [15] 中国联通研究院.算力网络架构与技术体系白皮书[R]. 2020. China Unicom Research Institute. White paper on computing power network architecture and technology system[R]. 2020.
- [16] 中国移动.算力网络技术白皮书[R]. 2022. China Mobile. White paper on computing power network technology[R]. 2022.
- [17] 中国移动.算力网络安全一体化全程可信解决方案白皮书[R]. 2024. China Mobile. White paper on trusted solutions for computing network security integration[R]. 2024.
- [18] ITU-T. Computing power network-framework and architecture: Y.2501[S]. 2021.
- [19] IETF. Computing-aware traffic steering (cats)[S]. 2023.
- [20] ITU-T. Signalling requirements for service deployment in computing power network: Q.4140[S]. 2023.
- [21] 中华人民共和国工业和信息化部.算力网络 总体技术要求: YD/T

- 4255—2023[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2023.
- Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. General technical requirements of computing power network: YD/T 4255—2023[S]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2023.
- [22] GONG X M, BAI C C, REN S Y, et al. A survey of compute first networking[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2023: 688-695.
- [23] WANG P, SUN W, ZHANG H B, et al. Distributed and secure federated learning for wireless computing power networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 9381-9393.
- [24] CHEN Z Y, ZHANG S C, TANG Y, et al. Optimization of computing power network routing strategies based on multi-agent soft actor-critic[C]//Proceedings of the 2024 9th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 426-430.
- [25] 李重严, 毕成, 张晟. 面向信息能源融合的低碳算力网络架构研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2022, 35(11): 1-6.
- LI Z Y, BI C, ZHANG S. Low carbon computing network architecture for information energy collaboration[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2022, 35(11): 1-6.
- [26] ZHOU J Q, WANG Y, LIL J. Data center energy consumption prediction model based on deep neural network BiLSTM[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 48th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 737-745.
- [27] JAYANETTI A, HALGAMUGE S, BUYYYA R. Multi-agent deep reinforcement learning framework for renewable energy-aware workflow scheduling on distributed cloud data centers[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2024, 35(4): 604-615.
- [28] LIU W Y, YAN Y J, SUN Y M, et al. Online job scheduling scheme for low-carbon data center operation: an information and energy nexus perspective[J]. Applied Energy, 2023, 338: 120918.
- [29] 杜宗鹏, 李志强, 陆璐. 算力网络四面三级算力度量技术体系[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 8-13.
- DU Z P, LI Z Q, LU L. Three-level and four-aspect computing measurement system in computing force network[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(4): 8-13.
- [30] 柴若楠, 郜帅, 兰江雨, 等. 算力网络中高效算力资源度量方法[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(4): 763-771.
- CHAI R N, GAO S, LAN J Y, et al. Efficient computing resource metric method in computing-first network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(4): 763-771.
- [31] 王施霖, 张岩, 李传宝, 等. 面向算力网络的算力建模与度量技术研究[J]. 邮电设计技术, 2024(6): 1-6.
- WANG S J, ZHANG Y, LI C B, et al. Research on modeling and measurement technology for computing power network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024(6): 1-6.
- [32] 李一男, 唐琴琴, 彭开来, 等. 以服务为中心的算力网络度量与建模研究[J]. 信息通信技术与政策, 2023(5): 21-29.
- LI Y N, TANG Q Q, PENG K L, et al. Research on measurement and modeling of service-centric computing power network[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2023(5): 21-29.
- [33] 余潇潇, 马玉草, 宋福龙, 等. 数据中心能耗建模及能量调节综述[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(8): 38-49.
- YU X X, MA Y C, SONG F L, et al. Overview of data center energy consumption modeling and demand response[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(8): 38-49.
- [34] LI J, BAO Z, LI Z Y. Modeling demand response capability by Internet data centers processing batch computing jobs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(2): 737-747.
- [35] IBRAHIM M, BHOPTTE S, SAMMAKIA B, et al. Effect of transient boundary conditions and detailed thermal modeling of data center rooms[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2012, 2(2): 300-310.
- [36] 曹畅, 张帅, 刘莹, 等. 基于通信云和承载网协同的算力网络编排技术[J]. 电信科学, 2020, 36(7): 55-62.
- CAO C, ZHANG S, LIU Y, et al. Convergence of telco cloud and bearer network based computing power network orchestration[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(7): 55-62.
- [37] 中国移动通信有限公司. 面向敏捷边云协同的算力感知网络解决方案[J]. 自动化博览, 2020, 37(7): 44-47.
- China Mobile Communications Group Co., Ltd. Solution of computing power awareness network for agile edge cloud collaboration[J]. Automation Panorama, 2020, 37(7): 44-47.
- [38] HEDAYAT K, KRZANOWSKI R, MORTON A, et al. A two-way active measurement protocol (TWAMP)[R]. 2008.
- [39] PHAAL P, PANCHEN S, MCKEE N. InMon corporation's sFlow: a method for monitoring traffic in switched and routed networks[R]. 2001.
- [40] ESTAN C, KEYS K, MOORE D, et al. Building a better NetFlow[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4): 245-256.
- [41] QUITTEK J, ZSEBY T, CLAISE B, et al. Requirements for IP flow information export (IPFIX)[R]. 2004.
- [42] CLAISE B, JOHNSON A, QUITTEK J. Packet sampling (PSAMP) protocol specifications[R]. 2009.
- [43] YU M L. Network telemetry: towards a top-down approach[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2019, 49(1): 11-17.
- [44] KIM C, SIVARAMAN A, KATTA N, et al. In-band network telemetry via programmable dataplanes[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM. New York: ACM Press, 2015, 15: 1-2.
- [45] 毛东峰, 贾曼, 何晓明, 等. 网络遥测技术及其在网络自动化运维中的应用[J]. 电信科学, 2021, 37(2): 154-163.
- MAO D F, JIA M, HE X M, et al. Network telemetry technology and its application in automatic network operation and maintenance[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(2): 154-163.
- [46] WANG X Y, DUAN X D, YAO K H, et al. Computing-aware network (CAN): a systematic design of computing and network convergence[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, 25(5): 633-644.
- [47] 张天策, 王剑晓, 李庚银, 等. 面向高比例新能源接入的配电网电压时空分布感知方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 37-45.
- ZHANG T C, WANG J X, LI G Y, et al. Perception method of voltage spatial-temporal distribution of distribution network with high penetration of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 37-45.

- [48] KONG X Y, ZHANG X P, ZHANG X Y, et al. Adaptive dynamic state estimation of distribution network based on interacting multiple model[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 643-652.
- [49] 张睿祺, 刘博, 韦尊. 非侵入式综合能源系统源荷状态联合感知方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3105-3115.  
ZHANG R Q, LIU B, WEI Z. Non-intrusive source-load state joint sensing method for integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3105-3115.
- [50] LIN L, WU J P, ZHOU Z, et al. Computing power networking meets blockchain: a reputation-enhanced trading framework for decentralized IoT cloud services[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(10): 17082-17096.
- [51] HAN L, XIE R C, REN Y Z, et al. An NFT-based distributed auction mechanism for multi-resource trading in computing power network[C]// Proceedings of the 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 528-532.
- [52] LI Y N, XIE R C, TANG Q Q, et al. Resource trading incentive mechanism based on Stackelberg game and auction theory in computing power network[C]// Proceedings of the 2023 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1201-1205.
- [53] XIE R C, WEN W, WANG W Z, et al. Incentive mechanism design for trust-driven resources trading in computing force networks: contract theory approach[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2025, 22(1): 618-634.
- [54] WEN W, LU L, XIE R C, et al. Secure incentive mechanism for energy trading in computing force networks enabled Internet of vehicles: a contract theory approach[J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 80(18): 26061-26087.
- [55] GUO Z W, PINSON P, WU Q H, et al. An asynchronous online negotiation mechanism for real-time peer-to-peer electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(3): 1868-1880.
- [56] LUO X, SHI W C, JIANG Y S, et al. Distributed peer-to-peer energy trading based on game theory in a community microgrid considering ownership complexity of distributed energy resources[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 351: 131573.
- [57] IZANLO A, SHEIKHOLESAMI A, GHOLAMIAN S A, et al. A combination of MILP and game theory methods for P2P energy trading by considering network constraints[J]. Applied Energy, 2024, 374: 123916.
- [58] CHEN Q J, YANG C, LAN S L, et al. Two-stage evolutionary search for efficient task offloading in edge computing power networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(19): 30787-30799.
- [59] FENG L, XIE R C, TANG Q Q, et al. Delay-prioritized task scheduling with load balancing in computing power networks[C]// Proceedings of the 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [60] XIE R C, FENG L, TANG Q Q, et al. Delay-prioritized and reliable task scheduling with long-term load balancing in computing power networks[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2024, 17(6): 3359-3372.
- [61] JIANG Y L, DONG F, GUO X L, et al. Potential game based workflow task offloading optimization mechanism in computing power network[J]. Computer Research and Development, 2023, 60(4): 797-809.
- [62] TANG Q Q, XIE R C, FENG L, et al. SIaTS: a service intent-aware task scheduling framework for computing power networks[J]. IEEE Network, 2024, 38(4): 233-240.
- [63] TANG Q Q, XIE R C, FANG Z R, et al. Joint service deployment and task scheduling for satellite edge computing: a two-timescale hierarchical approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(5): 1063-1079.
- [64] ZHANG S Y, XU M R, LIM W Y B, et al. Sustainable AIGC workload scheduling of geo-distributed data centers: a multi-agent reinforcement learning approach[C]// Proceedings of the GLOBECOM 2023-2023 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2023: 3500-3505.
- [65] LIU Z T, QIU C, ZHAO Y F, et al. Bat-FG: a broad attention based fine-grained offloading in green computing power networks[C]// Proceedings of the ICC 2023-IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 5117-5122.

## [作者简介]



谢人超 (1984-), 男, 福建南平人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息中心网络、工业互联网、算力网络、边缘计算、无服务器计算等。



胡珉昊 (2001-), 男, 河北邯郸人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为算力网络、边缘计算等。



唐琴琴 (1994-), 女, 广西桂林人, 博士, 北京邮电大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为算力网络、网络人工智能、网络孪生等。



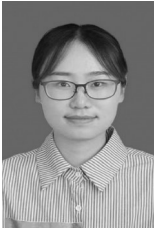
黄韬 (1980-), 男, 重庆人, 博士, 北京邮电大学教授, 主要研究方向为网络系统架构、算力网融合、确定性网络等。



彭开来 (1987-), 男, 江苏盐城人, 紫金山实验室研究员, 主要研究方向为标识解析、边缘计算、时间敏感网络、大数据等。



张力 (1966-), 男, 湖南长沙人, 中国电力工程顾问集团有限公司正高级工程师, 主要研究方向为火力发电及污染物治理、核能发电、新能源发电等。



文雯 (2001-), 女, 安徽宿州人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为算力网络、边缘计算、区块链等。



句赫 (1981-), 男, 黑龙江肇东人, 中国电力工程顾问集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为人工智能、算电协同等。



罗必雄 (1966-), 男, 湖北荆州人, 中国电力工程顾问集团有限公司正高级工程师, 主要研究方向为煤炭清洁高效利用、多能互补、新能源与新型电力系统等能源新技术。



李舒涛 (1985-), 男, 江西南昌人, 博士, 中国电力工程顾问集团有限公司正高级工程师, 主要研究方向为数能融合、算电协同等。