DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.12.003

算电协同技术与应用发展研究

陈晓红[1,2,3]，**吕建**[1,2]，**刘咏梅**[1*]

（1. 中南大学商学院，长沙 410083；2. 湘江实验室，长沙 410083；3. 湖南工商大学前沿交叉学院，长沙 410205）

摘要：算电协同是应对人工智能算力需求爆发式增长和全球能源转型挑战的关键路径，发展质量事关“双碳”目标推进、算力基础设施可持续升级。本文在梳理算电协同发展现状的基础上，辨识了物理基础、使能技术、市场机制、产业生态等层面的发展挑战，构建了贯通“规划–建设–运行–市场”全链条的算电协同体系框架、涵盖“物理资源–数据融合–协同优化–应用服务–支撑体系”的层次化功能架构。分析了感知、通信、计算、控制、安全等维度的算电协同关键技术，构建了能效、碳效、协同响应、经济价值等维度的算电协同指标体系，为评价算电协同能力、量化算电协同成效的提供统一基准。剖析了单元级协同、链路级协同、区域级协同、全局级协同等典型应用场景，明确了算电协同在能效提升、碳效优化、跨域协同、系统弹性等方面的应用价值。进一步展望了算电协同在架构耦合、技术使能、机制创新、生态培育等方面的发展趋势，提出算电协同将逐步实践从信息互通到业务协同再到生态融合的螺旋式上升路径。相关内容具有现实性、系统性、前瞻性，显现了算电协同的战略价值与发展方向。

关键词：算电协同；一体化算力网；算力基础设施；新型电力系统；算力调度；新能源消纳

中图分类号：TP30　　**文献标识码：**A

Technologies and Applications of Computing–Electricity Synergy

Chen Xiaohong[1,2,3], **Lyu Jian**[1,2], **Liu Yongmei**[1*]

(1. Business School, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410083, China; 3. School of Advanced Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: Computing–electricity synergy is a critical pathway to address the explosive growth in artificial intelligence computing demand and the challenges in global energy transition. The quality of its development is vital for advancing the carbon peaking and carbon neutralization goals as well as the sustainable upgrading of the computing infrastructure. This study reviews the current state of computing–electricity synergy, identifies challenges in terms of physical foundations, enabling technologies, market mechanisms, and industrial ecosystems, and constructs a comprehensive computing–electricity synergy framework spanning the planning–construction–operation–market chain. Moreover, it establishes a hierarchical functional architecture encompassing physical resources, data fusion, coordinated optimization, application services, and support systems. The study also analyzes key technologies in computing–electricity synergy across sensing, communication, computing, control, and security dimensions, as well as an indicator system covering energy efficiency, carbon efficiency, coordinated response, and economic value, to provide a unified benchmark for evaluating synergy capabilities and quantifying outcomes. Typical application scenarios are explored, including unit-level, link-level,

收稿日期：2025-12-02；**修回日期：**2026-01-13

通讯作者：*刘咏梅，中南大学商学院教授，研究方向为人工智能、能源管理、决策理论与方法；E-mail: ym_liu07@163.com

资助项目：中国工程院咨询项目“促进新质生产力发展的未来重点产业战略布局及实施路径研究”(2025-XBZD-14)；国家自然科学基金项目(72088101)；湘江实验室项目(24XJ01001)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

regional-level, and global-level synergies, clarifying the values of computing–electricity synergy in energy efficiency enhancement, carbon efficiency optimization, cross-domain coordination, and system resilience. Further prospects are outlined for trends in architecture coupling, technological enablers, mechanism innovation, and ecosystem cultivation, proposing that computing–electricity synergy will gradually advance along a spiral path from information interoperability to business coordination and ultimately ecosystem integration. The study demonstrates practicality, systematicity, and foresight, revealing the strategic value and development direction of computing–electricity synergy.

Keywords: computing–electricity synergy; integrated computing power network; computing infrastructure; new power system; computing power scheduling; new energy consumption

一、前言

随着大模型技术突破、生成式人工智能（AI）兴起，算力需求呈爆发式增长，算力基础设施逐步成为国际性的科技竞争焦点。全球范围内积极投资算力中心建设，如我国“东数西算”工程、美国“星际之门”计划[1]、欧盟“人工智能大陆行动”计划[2]。算力中心持续高速扩张，不可避免地带来电力消耗急剧攀升，在保障算力供给的同时有效控制能源消耗成为亟待解决的重大课题[3]。在此背景下，算电协同理念应运而生，旨在突破计算设施与电力系统分立运行且能耗单向的传统模式，转而直面高耗能算力设施规模化发展带来的能效挑战，响应新型电力系统对灵活调节资源的迫切需求，推动算力、电力两大系统由“各自为政”转向“协同共生”[4]。

围绕算电协同这一复杂系统工程，学术界构建了从顶层战略设计到底层物理技术支撑的多层次研究矩阵。在理论层面，聚焦算力、网络、能源协同创新，提出了“算网能”一体化架构，从度量、感知等维度探讨了研究难点与应用挑战[5]；针对数据中心的节能降碳，梳理了信息技术（IT）设备能效优化、供电与制冷系统能耗管控的基本进展，辨析了绿色能源接入、“算网能”协同规划等数字基础设施低碳发展的关键方向[6]。也有学者围绕单一环节或单项技术开展综述，如计算设施与配电网的集成规划方法[7-8]、先进散热技术[9]、工作负载迁移[10]、多能互补供能架构[11]，也关注运行调度阶段的“算力逐绿”策略优化问题[12-14]。尽管如此，现有研究未能系统性讨论算电跨系统协同的关键使能技术，也缺乏前沿技术与实用场景的关联验证，导致算电协同实践仍依赖政策驱动与试点经验，尚未形成具备内生活力的规模化发展路径。

本文围绕“规划–建设–运行–市场”全链条构建算电协同体系框架，梳理关键支撑技术的进展与趋势，分类阐述典型应用场景的运行机理与实践特征；着力厘清算电协同发展的可行路径，探索算力与电力智能融合且深度协同的发展模式，推动算力与电力两类资源在时空维度上的高效适配与优化配置。相关内容将促进AI、工业互联网等数字经济关键技术的发展，支持清洁能源规模化消纳、计算产业绿色低碳转型，为“数字中国”建设、“双碳”目标推进提供理论支撑与实践参考。

二、算电协同的发展现状与面临挑战

（一）算电协同的发展现状

算电协同是应对AI算力需求爆发式增长、全球能源转型挑战的关键路径，相应发展具有系统性融合的鲜明特征。因资源禀赋、政策导向、市场环境的不同，各国形成了差异化的发展模式。

北美地区在AI和算力产业方面处于领先位置，算电协同体现出从被动依赖电网到主动构建自给自足能源体系的发展趋势。面对生成式AI普及带来算力中心电力需求激增的情况，美国电网已接近承载极限，出现了因电力短缺而排队等待并网的“幽灵”数据中心。为此，北美地区的AI基础设施积极转向自供电模式[15]，逐步形成了企业主导、资本涌入的市场化发展路径。例如，在得克萨斯州西部地区开始建设大型数据中心综合体，将集成自发电能力以避免对公共电网的依赖[16]；微软公司计划采用核能为数据中心、AI项目供电，谷歌公司积极探索分布式能源应用[17]；大规模的资本投入也在支持算力中心自建发电项目[18]。

欧洲在算电协同方面采用了规划主导的发展路径，通过欧盟层面的统一规划、各成员国之间的协同来应对算力增长与能源约束的矛盾。欧洲现有的算力中心容量集中在伦敦、阿姆斯特丹、巴黎、都柏林等枢纽节点。2025年，欧盟委员会启动“人工智能大陆行动”计划，提出了7年内将数据中心容

量增加两倍的目标，由此扩充数字基础设施规模。当前的算力中心计划项目如期实现后，将带来极大的电力负荷需求[19]。2025 年，美国电力研究院将“DCFlex 计划”扩展至欧洲[20]，探索以算力中心支持电网的方式优化资产利用并提高互联效率，新建灵活性中心并整合电网资源，增强运营和部署的灵活性。

我国算电协同具有国家战略驱动的发展特征，形成了顶层设计引领、政策体系支撑、实践探索互动的综合推进框架。2022 年“东数西算”工程启动，国家层面确立了数据中心与电力网一体化设计的主导方向，将算电协同上升为国家战略；后续政策逐步深化，形成了全链条政策支撑体系。地方和企业积极响应，如宁夏中卫、贵州贵安等算力枢纽采用“源网荷储”一体化模式实现清洁能源就近消纳，主要通信运营商开发了“息壤”“星罗”等算力调度平台。整体上，我国算电协同从政策设计转入工程实施阶段，为应对未来的算电协同系统性挑战构建了基础条件。

国外以企业自建、规划主导的多元化探索，国内在顶层战略引领下的系统性推进都表明，全球范围内算电协同已从概念构想转入规模化实施阶段。各国通过政策创新、技术融合、商业模式示范，基本验证了算电协同在提升能源效率、保障算力供给、促进绿色低碳等方面的良好潜力。不可忽视的是，当前的算电协同实践侧重物理层面的供电保障与绿电替代，而对算力与电力两大系统之间实时感知、双向互动、全局优化的深层次协同关注不够，依然存在着基础性、系统性的发展瓶颈。这些瓶颈环节并非单一技术或市场问题，而是贯穿物理基础、使能技术、市场机制的多维度与复合型挑战，制约着算电协同向高效、智能、普惠的高级形态演进。

（二）算电协同面临的挑战

1. 物理基础层面：刚性电网与弹性算力的根本矛盾

算电协同的底层矛盾源于电力系统、算力系统在物理本质上的差异性。电力系统是需要时刻保持功率平衡的物理网络，电能生产、传输、消费具有高度的瞬时性与同步性，系统稳定性严格依赖物理定律约束。算力网络则呈现显著的弹性与可调度性，计算任务具有可中断、可迁移、资源动态伸缩的特性。这种刚性与弹性的物理属性冲突，构成了算电协同的底层障碍：将时空分布灵活、功耗动态变化的算力负载无缝适配至要求功率实时平衡、运行点严格受限的刚性电网，且不引发电网安全稳定问题。

2. 使能技术层面：状态感知与协同决策的连通瓶颈

电网的潮流、频率等电气状态与算力设施的功耗、任务队列等运行状态分别属于异构数据体系，缺乏统一、高效的全景感知与融合量测技术而致“数据孤岛”。在算电协同决策层面，需要在秒 / 毫秒级时间尺度上对跨域异构资源进行联合优化调度的智能算法，不仅能够响应算力需求，而且可以前瞻性评估并规避对电网运行的潜在风险，支持从数据贯通到智能决策的能力闭环。现有的技术水平难以支撑跨域、实时、双向的算电协同控制。

3. 市场机制层面：多元主体与规则体系的适配困境

市场机制设计是推动算电协同应用的核心环节之一，但面临多元主体利益与传统规则体系的适配困境。算电协同生态涵盖电网企业、发电集团、云服务商、数据中心、广大用户，各自的利益诉求存在差异。算力、电力两套市场体系在价值尺度、交易品种、出清机制、结算规则上相互独立，缺乏有效的价值传导通路。例如，算力调度为电网提供的灵活性辅助服务价值、绿色电力消费产生的环境溢价，都难以在现有的市场框架下进行准确量化与合理分配。设计兼容电能量、算力资源、衍生辅助服务的统一市场或耦合市场机制，确立公平、透明、激励相容的利益分配规则，成为制度设计层面的深层次挑战。

4. 产业生态层面：产业割裂与生态协同的融合壁垒

电力行业、信息通信产业历经数十年独立发展，各自形成了高度成熟的技术标准体系、监管框架、商业文化、产业生态。电力行业强调安全至上、规范驱动、长周期稳健投资，算力产业则崇尚创新迭代、敏捷开发、风险投资。这种根植于各自行业基因的范式差异，引发了基础设施规划、技术路线选择、数据主权界定、安全责任划分等方面的协同壁垒。产业各方多局限于自身价值链进行闭环

发展，缺乏共建共享、共创价值的顶层设计与协同治理平台。推动算电协同不仅是技术集成过程，更是深刻的产业生态变革，亟需打破传统行业壁垒，建立跨领域的信任、共识、协同治理框架。

三、算电协同的体系架构与关键技术

本研究应用系统性思维，提出了算电协同体系架构，解决算力和电力两类资源在时间、空间、机制上的错配问题，形成逻辑严密、运转有效的协同蓝图，支持打破算力与电力行业壁垒并推动两类基础设施融合。细分出算电协同的体系框架、功能架构两部分：前者从全生命周期的维度出发确立了宏观协同机制；后者从技术实现的空间维度切入构建了从物理资源到应用服务的5层功能架构。两部分互为表里、紧密关联，共同支撑算力和电力资源的高效配置与可持续发展。

（一）算电协同的体系架构

1. 算电协同的体系框架

算电协同的体系框架涉及规划、建设、运行、市场4个层次（见图1）。以系统思维打破算力和电力系统的传统壁垒，通过战略目标、工程实施、调度优化、价值机制等维度的协同，贯通从战略布局到市场交易的全链条业务，最终目标是塑造系统韧性可靠的新型数字基础设施发展范式。

规划协同作为体系基础层，聚焦算力基础设施与电力系统在时空尺度上的前瞻性匹配。建立跨行业、跨区域协调机制，统筹区域算力需求、能源资源禀赋、网络传输能力等关键因素，形成全国一体化的“算力–电力”协同布局，确保算力和电力在长期发展目标、地理分布、建设时序上达成最优衔接。

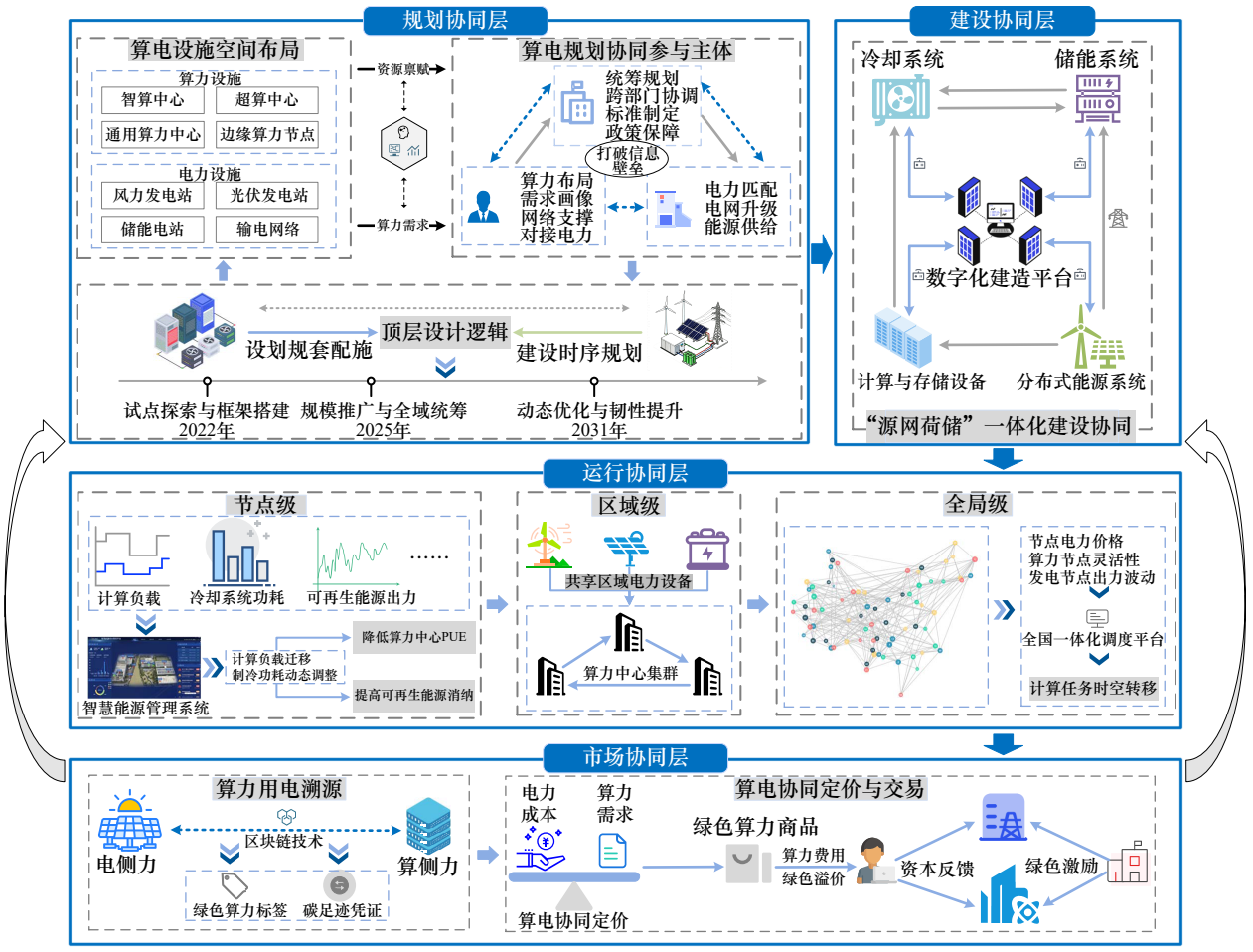


图1　算电协同的体系框架

注：PUE表示电源使用效率。

协同推动算力基础设施和多元化供能系统的物理集成与智能化工程，支持开展算力设施和本地多元化供能系统的一体化设计与建设。统筹设备选型、容量配置、能源结构等关键环节，构建园区级综合能源系统，形成多能互补与优化配置能力。推广应用自然冷却、余热回收等技术，进一步降低算力中心的冷却能耗。基于物联网、AI技术搭建数字化建造平台，推动用能设备与算力设施的智能联动及精细化管理，为运行阶段的算电协同调度筑牢物理基础条件。

运行协同作为体系核心层，重在推动算力系统和电力系统的实时互动与优化调控。相应决策过程融入计算任务的时序特性与可迁移性、电网的实时潮流与频率状态、动态电价与碳强度信号等变量，在保障服务质量与电网安全的前提下开展跨区域算力调度、负荷聚合响应、内部能效优化的协同，以全面提升系统运行效率和可再生能源消纳水平。

市场协同作为体系价值实现层，通过机制创新将物理层面的协同转化为可持续的经济激励。建立基于电力供需关系的算力价格形成机制，推出绿电与算力耦合的绿色交易品种，探索应用算力消费碳足迹认证与交易体系。在构建多元化市场交易机制和商业模式的基础上，算力用户依据电价、碳排放信息来灵活调整算力使用策略，电力用户通过需求响应参与算力市场，最终形成可持续的价值循环与发展生态。

2. 算电协同的功能架构

基于算电协同的体系框架，从顶层设计角度出发解构了协同范畴与业务逻辑。宏观战略的落地还依赖中观层面技术路径的精准支撑，以将概念性的协同关系转化为可执行、可集成的系统功能。进一步构建了算电协调的分层功能架构（见图2），通过“物理资源–数据融合–协同优化–应用服务–支撑体系”的层次化模型，对体系框架中的协同理念进行系统化映射，以连接战略蓝图与工程实施。

具体地，物理资源层作为实体底座，对算力和电力设施进行统一接入与抽象池化，为建设和运行阶段的硬件集成提供基础支撑；数据感知和融合层作为信息枢纽，对算力和电力系统的多源异构运行数据进行实时采集、轻量化处理、统一语义建模，以适配规划阶段的基础数据需求，为运行和市场阶段提供动态数据支撑；协同优化层充当决策核心，依托智能算法并在时空维度上联合调度计算任务与电力资源，以实施运行阶段的实时调控，满足规划

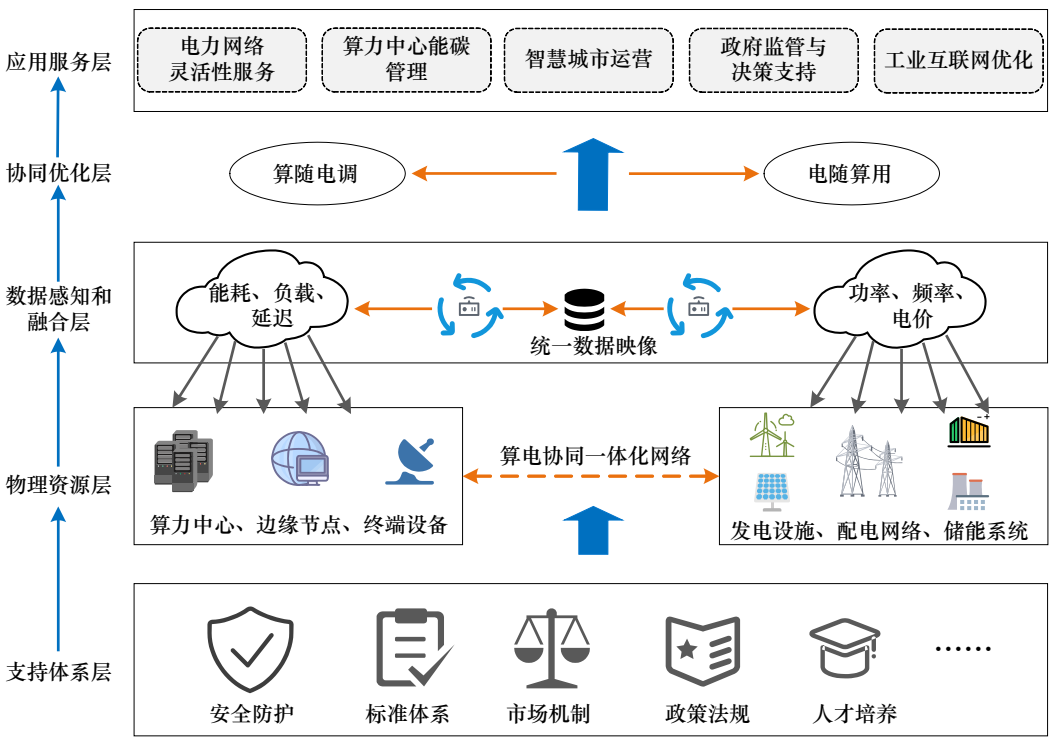


图2　算电协同的功能架构

阶段的布局优化要求；应用服务层面向最终用户封装协同价值，提供绿色算力套餐、需求响应合约、碳足迹报告等标准化服务，支撑市场阶段的价值变现；支撑体系层横向贯穿全域，为各阶段协同提供互操作性、安全性、合规性保障，厘清流程与技术的功能边界，避免要素重叠，确保双架构的动态适配与逻辑自洽。

（二）算电协同的关键技术

算电协同从逻辑架构迈向实体运行，面临异构资源泛在接入、数据实时交互、多目标复杂决策、内生安全防御等挑战，相应功能架构的有效运转需以各层级关键技术（涵盖感知、通信、计算、控制、安全等）为支撑。面向功能架构各层级的内在需求，梳理并分析支撑算电协同的关键技术（见表1），为后续的技术攻关、路径优化提供基础能力条件。

1. 物理资源层

（1）异构算力资源池化技术

该技术的核心目标是打破计算资源在物理形态、架构归属、地理分布方面的壁垒，将中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）等异构算力资源抽象并汇聚成全局共享、统一管理的算力资源池。早期研究集中于硬件虚拟化技术[21]，通过虚拟机对整个服务器硬件进行抽象并池化CPU资源，但开销较大、对GPU等加速器支持不佳。近年来，具有轻量级、高性能优势的容器化技术成为业界主流[22]，如Docker[23]、Containerd[24]等容器引擎支持应用运行环境的隔离与封装，Kubernetes[25]通过设备插件机制为GPU、现场可编程逻辑门阵列等异构芯片提供了接入与管理框架，成为异构算力池化的业界标准方案。研究层面发展了更具通用性的抽象框架（如硬件抽象层[26]），为上层应用提供统一的异构编程接口。例如，面向大规模模型的混合并行分布式训练系统[27]、统一训练框架[28]，支持在不同架构和软件栈芯片构成的超异构集群上高效执行大语言模型训练。然而，现有进展较多局限于单一厂商或特定硬件类型，构建跨架构、跨厂商的统一算力度量与建模标准仍是研究难点和热点。

（2）弹性功耗管理技术

该技术成为算电协同的核心技术之一，通过动态调整计算资源的功耗状态并结合先进散热方案，可在保证服务质量的前提下显著降低系统能耗；涵盖先进散热、动态电压频率调节（DVFS），二者协同作用以精细化管控计算系统能效。在先进散热技术方面，液冷系统因能效比突出而成为高密度算力中心的优先选择，主要包括冷板液冷、浸没液冷两种形式，朝着更高效率、更安全可靠的方向发展[29]。先进的冷板液冷方案重在解决漏液风险、提升换热能力。为应对下一代超高热流密度芯片的散热需求，正在研发两相冷板与微通道冷板[30]。浸没液冷在散热效率、能源利用率方面具有优势，单相或相变浸没系统采用箱体均流设计、氟化液等冷却工质，可将数据中心的电源使用效率（PUE）保持在1.1以下，同时解决芯片局部热点问题。例如，“歧管–微射流–锯齿微通道”复合嵌入式微流结

表1　算电协同各个功能架构层的关键技术及作用

功能架构层	关键技术	作用描述
物理资源层	异构算力资源池化技术	将异构算力抽象汇聚为全局共享、统一管理的算力资源池
	弹性功耗管理技术	实现计算系统能效的精细化管控
	多能互补协同调度技术	为算力设施提供可靠的电力保障
	高速可靠通信技术	保障算电协同所需的实时数据交互和精准控制
数据感知和融合层	边缘智能感知技术	对海量异构电力数据和计算设施状态数据的就地采集与初步分析
	数据轻量化技术	降低数据在传输、存储及后续处理过程中的资源占用，提升数据的信息密度
	数字孪生技术	精准刻画算–电系统动态运行状态
协同优化层	算电协同调度优化技术	通过计算任务与电力资源的协同规划与动态调配，降低运营成本提高能效
应用服务层	算电联合定价技术	构建算力与电力的价值关联及价格传导路径
	绿色溯源技术	追踪算力设施电力来源，量化绿色属性与碳排放
支撑体系层	网络安全技术	应对数据流与能量流深度交互及实时调控带来的安全风险
	隐私计算技术	保护算力和电力敏感数据不泄露

构，仅以单相水作为冷却介质即可实现3000 W/cm^{2}的超高热流密度芯片散热，也将冷却功耗降低至0.9 W/cm^2[31]。在DVFS技术方面，动态调节处理器的电压及频率并与实时计算需求匹配，以达到节能目标[32]。在算电协同框架下，DVFS的作用进一步深化，面对紧密耦合的计算任务调度、电网实时状态，从单一的处理器节能手段演进为系统级资源协调的关键机制。然而，弹性功耗管理在预测可靠性、液冷规模化部署成本、环境保护风险、芯片级散热集成等方面仍面临挑战，需开发智能预测算法、高效散热材料、新型热管理架构，推动算力、电力、供冷系统的一体化协同。

（3）多能互补协同调度技术

该技术优化并灵活调度“风光热储”等多元能源系统，平抑新能源出力波动，为算力设施提供稳定的绿色电力保障，支撑算电协同系统可靠运行。多能互补应用研究聚焦光伏、风电、储能构成的系统并以电加热、储热为辅助，能够优化设备装机容量、评估系统发电经济性[33]，在实际应用中展现出良好价值。在绿电智算融合智能微电网示范项目中，应用“风光储充+算力中心”的协同模式并开展智慧调度，实现算力中心100%的绿电消纳、运营成本的大幅降低[34]。学术层面探索侧重构建“风光储”为核心的多元能源系统容量配置与运行优化模型[35-36]。然而，多能互补调度过程中存在多时间尺度协同、不确定性建模两方面难题：针对前者，主要以耦合日前全局规划、日内／实时滚动时域优化的方式，缓解刚性负荷与可再生能源发电的时序错配问题[37]；针对后者，多进行数据驱动的鲁棒建模（利用非参数化方法挖掘源、荷分布特征，构建自适应不确定集，降低多能互补调度的保守性冗余）[38]，风险约束关系构建（引入条件风险价值等指标，对电力缺供等越限风险进行量化与控制）[39]。

（4）高速可靠通信技术

该技术支持构建低时延、高可靠、大带宽的通信网络，确保电力生产、传输、消费等环节与计算设施之间的实时数据交互与精准控制，形成能源流、算力流的融合通道。建立算电协同系统的通信基础设施，支撑广域协调控制、分布式算力调度等核心应用，具体涉及四方面：依托时间敏感网络等机制构建确定性网络，为关键业务提供微秒级的时间同步与确定性的时延保障[40]；应用第五代移动通信（5G）及演进技术的超可靠、低时延通信与网络切片能力，为算电协同系统提供灵活的无线连接能力[41]；基于光传送网等架构形成光通信能力，构建电力骨干通信网络，支持太比特每秒级传输带宽[42]；部署软件定义网络，通过网络资源智能调度与集中管控提升算电协同系统的运行效率[43]。算电协同对通信网络的要求并不是简单提升带宽或降低时延。电力业务强调确定性、安全性、连续性，算力业务关注弹性带宽、突发流量承载，二者在业务逻辑和控制要求上并不一致；通信链路出现拥塞、抖动或者指令延迟，可能直接影响算力迁移效果甚至干扰电网的负荷响应。后续，应从单项通信能力提升转向面向算电协同业务的确定性承载、弹性切片、跨域互操作与安全隔离，形成可同时支撑电力控制、算力调度、市场信息交互的通信基础能力。

2. 数据感知和融合层

（1）边缘智能感知技术

该技术面向智能传感设备与边缘计算节点部署，支持海量异构电力数据、计算设施状态数据的就地采集与初步分析，满足算电协同对数据处理的实时性、低延迟、高可靠性要求。不仅显著减轻了云端数据中心的传输与存储压力，而且支撑了配网故障诊断、局部无功补偿、分布式能源波动调控等关键业务的毫秒级自主快速响应，构成算电协同系统稳定运行的本地化决策基础。主要围绕硬件、平台、算法等层面形成边缘智能感知先进解决方案。在硬件层面，集成机器学习核心或专用神经网络处理单元的智能传感器、微控制器成为主流[44]，可在数据源头直接执行实时分析与事件判别，显著降低系统功耗与响应时延。在软件与平台层面，以英伟达Holoscan为代表的开发框架与工具链较为成熟，提供了模块化、自动化的模型优化功能，降低了边缘AI应用的部署与管理难度，支持高效可靠的“感知–决策”闭环。在算法方面，边缘轻量模型、云端大模型协同机制成为前沿热点。应用硬样本挖掘机制，支持边缘设备处理常规任务，而仅将复杂场景上传至云端大模型进行深度分析[45]，可在严苛资源约束下平衡感知精度与响应效率，为算电协同系统应对未知及复杂工况提供感知能力。

（2）数据轻量化技术

该技术在信息价值不显著损耗的前提下对原始

数据进行“去冗余”“提纯”，以降低数据在传输、存储、处理过程中的资源占用，为决策分析模块提供更高质量的数据输入、优化算电协同系统的综合效能。基于字典编码、差分编码等经典算法的无损或有损压缩方法仍是基础手段，广泛应用于物联网传感数据包的初步处理。随着机器学习的发展，学习型压缩框架[46]能够利用数据的时间和空间相关性，自适应识别运行数据中的冗余结构，通过存储预测残差、模型参数即可实现远高于传统方法的压缩比与随机访问效率[47]。为了满足边缘侧部署AI模型的需求，AI模型自身的轻量化也成为研究热点[48]。算电协同场景下的数据轻量化不宜简单追求压缩比，这是因为电网扰动、算力负载突增等事件虽然出现频率不高，但是参与决策的价值较高。数据轻量化应围绕不同业务目标展开，如强调安全控制类数据的保真与实时、能效和碳核算类数据的长期可用、边缘决策类数据的本地提取与事件触发上传。未来可建立面向算电协同业务语义的数据提纯机制，兼顾通信效率、数据质量、决策可靠性。

（3）数字孪生技术

该技术可将物理系统的刚性约束、计算任务的弹性需求进行实时闭环的智能匹配，在算电协同体系中发挥着认知中枢的关键作用，即构建与物理系统同步演进的高保真虚拟镜像，开展电力网络、算力设施动态状态的精准刻画与前瞻推演。例如，深圳市在123座5G基站部署了“数字孪生机柜+虚拟电厂”平台，在应用轻量化孪生模型后，自动将可延迟的边缘计算任务调度至光伏大发时段，实现本地用电削峰18%、能耗降低7%[49]。数字孪生技术正在从精确建模向智能认知转型，基于物联网传感器、流处理平台的动态建模成为基础能力，以语义建模与AI代理的融合作为研究前沿[50]。采用NGSI-LD等标准构建语义化模型[51]，系统组件具备自我描述与互操作能力，为AI代理的模块化部署创造了条件。引入代理型AI，推动数字孪生从辅助决策向自主执行演进，能力成熟后将承担相当比例的日常运营决策任务[52]。

3. 协同优化层

应用算电协同调度优化技术，实施计算任务、电力资源的协同规划与动态调配，以降低运营成本并提高能效。根据调度范围与控制域的不同可划分为算力中心内部协同调度、跨算力中心的广域协同调度两个层次。

在算力中心内部协同调度层次，单一算力中心或计算集群内部的资源与能耗精细化管理是研究重心。将电力成本、可再生能源的波动性供应作为关键决策变量，据此动态调整计算负载分布，如应用负载均衡算法将可延迟的批处理任务迁移至电价低位或可再生能源充沛时段执行[53-56]。

在跨算力中心的广域协同调度层次，相关研究关注广域时空尺度上算力和电力的全局协同优化，分为碳感知任务调度、电网需求响应两方面：前者通过广域任务路由机制，将可迁移计算任务引导至可再生能源富集、电力成本更低的区域执行[57]；后者将分布广泛的算力中心集群整合为电网中一类灵活可控的聚合负荷，在电网负荷高峰或可再生能源消纳困难时期协同调节总用电功率以参与调峰、调频等辅助服务，在提升电网稳定性的同时获取经济收益。

两个层次的协同调度均需要在算力服务质量、成本等相互冲突的目标之间进行动态权衡，这是算电协同调度优化技术的难点。基于随机优化的在线控制方法[58]、深度强化学习方法[59]是解决该难点的主流方法：前者利用精确的数学模型获得严格满足约束的方案，后者从大量数据中进行学习进而获得自适应权衡策略。

4. 应用服务层

（1）算电联合定价机制

算电联合定价机制作为新型的资源协同模式，通过构建算力、电力的价值关联与价格传导路径，推进优化资源配置、引导绿色消费的双重目标。中国南方电网有限责任公司研发的算力–能耗映射模型，支持算力任务与电力消耗动态关系的量化分析，将电力市场的时空价格信号精准内化为算力服务的成本要素，形成可灵活响应市场变化的动态算力定价策略[60]。由此引导算力运营企业基于实时电力成本及时调整算力服务报价与服务器集群的负荷分配策略，通过市场化手段激发算力负荷参与电网调峰的积极性。算电联合定价机制的应用瓶颈在于参与主体的利益诉求存在根本性的非一致性：电网侧追求运行安全，算力运营商关注成本控制与服务溢价，绿电供应商追求获取低碳溢价，终端用户期望服务质量与综合成本尽量平衡。由此引发定价决

策与收益分配的多重矛盾[61]。现有研究主要采用博弈论构建分析框架，如多主体Stackelberg主从博弈模型[62]、融合随机规划、Nash-Harsanyi讨价还价理论的博弈模型[63]。然而，主从博弈通常预设固定的层级权力结构，难以刻画对等主体之间的灵活互动；合作博弈虽然可以寻求联盟最优，但求解过程伴随极高的计算复杂度。两类范式均难以适配未来大规模算电协同系统对实时、高频、动态定价的迫切需求，亟待方法论的创新突破。

（2）绿色溯源技术

该技术支持建立数字化的环境价值核算体系，精准追踪算力设施消耗电力的来源并量化绿色属性与碳排放；为算力产业的绿色低碳发展提供了关键的数据基础，支持应用服务层出具有公信力的绿电消费证明，在有效应对国际碳壁垒挑战的同时，消除传统绿证模式下可能的“漂绿”质疑。相关研究主要围绕两条技术路径展开：基于电力交易凭证的溯源方法[64]，分析用户的购电合同与结算数据，以经济流为依据进行电能的来源认定与绿色属性分配；结合区块链的增强型溯源方案[65]，将绿电生产、交易、传输、消费的关键数据在链上进行不可篡改的存证，提升溯源结果的可信度与透明度[66]，支持绿电消费记录的国际互认。在技术标准逐步统一、国际互认机制完善后，绿色溯源技术将超越算电协同体系中的工具角色，演进为全球能源转型过程中具有基准意义的价值共识机制，从而推动数字基础设施、能源系统在低碳转型路径上的深度协同与互促发展。

5. 支撑体系层

（1）网络安全技术

算电协同的本质是数据流、能量流的深度交互与实时调控，这种高度互联与自动化特性带来了安全方面的挑战。现有的工业防火墙、逻辑隔离、入侵检测等技术为边界防护、访问控制、异常识别等提供了基础支撑[67]，如国家电网有限公司在“源网荷储”项目中采用相关技术，在绿电占比为65%的情况下保障了数据中心的安全运行，但整体上仍以单域防护、静态防御为主，不足以适应算力系统与电力系统跨域互联、动态调度、实时控制的协同特征。发展算电协同网络安全技术，并非是传统安全手段的简单叠加，而在于研究面向“网络–物理”融合场景的协同防护机制；重点突破多域身份信任、异常行为实时感知、攻击影响动态隔离、系统自主恢复等关键问题，构建兼顾实时性、联动性、韧性的内生安全体系。

（2）隐私计算技术

算电协同系统的精确负荷数据与拓扑结构、用户侧的用电行为模式、算力中心的能耗信息等较为敏感，在传统共享模式下存在泄露风险。安全多方计算、联邦学习、差分隐私等隐私计算技术[68]，为解决数据隐私保护、协同计算优化之间的矛盾提供了条件，但在算电协同场景中面临计算效率、通信时延、数据异构、可信验证等约束。从实时调度和动态控制需求的角度看，隐私保护强度、优化效果、系统响应速度之间尚未取得有效平衡。整体来看，当前的隐私计算技术并非单项方法能力不足，而是尚未与算电协同的运行机理深度融合。未来应重点研究面向实时协同调度的分层隐私保护架构，构建兼顾隐私安全、计算效率、决策性能的协同优化机制。

（三）算电协同的指标体系

算电协同是涉及能源、信息通信领域的复杂系统工程，技术落地、市场推广、规模化发展应以协同效果的量化评估为依据，而这是当前研究的薄弱环节。对照算电协同体系架构的核心目标，结合现行政策要求、相关行业标准、典型实践案例，梳理出覆盖能效提升、碳效优化、跨域协同、经济价值等维度的算电协同指标体系（见表3），为当前亟待开展的协同效果评估、进一步的深化研究提供基础条件。

四、算电协同的典型应用场景与案例分析

随着“东数西算”工程全面启动、“双碳”战略深入推进，算力基础设施与电力系统的深度耦合成为必然趋势。算电协同作为匹配发展目标的核心范式，可根据协同范围与层级，构建多层次、多维度的算电协同应用生态：始于单个数据中心的内部精细化管控（单元级协同），延伸至支撑算力流动的高可靠网络连接（链路级协同），演进为区域集群内资源的池化共享与互备调度（区域级协同），促成国家层面算力与电力基础设施的顶层统筹与双向互济（全局级协同）。

表3　算电协同的关键指标及含义

一级指标	二级指标	指标含义	参考文献
能效协同	电源使用效率	算力中心能源效率，是建设、运行阶段的核心能效指标	[3-4]
	绿电消纳率	算力设施对绿色电力的消纳能力，是“电随算用”的直接体现	[4]
碳效协同	算力碳强度	单位算力的碳排放水平	[9]
协同响应	任务迁移响应延迟	跨域算力调度的实时性，是“算随电调”的响应指标	[4]
	电网负荷调节响应速度	算力设施对电网指令的灵活性，是双向协同的弹性指标	[10]
经济价值	算力成本降低率	算电协同对算力服务成本的优化效果	[4,49,61]
	电力成本节约率	协同调度（如错峰、绿电直供）带来的电力成本优化	[4,61]

（一）单元级协同

单元级协同（见图3）聚焦单个算力中心内部的精细化能源管理，以实现算力中心自身的节能降耗、绿色电力使用比例的有效提升为核心目标，成为应对挑战的实践起点。在这一场景下，算力中心不再是被动的电力消耗单元，而是可与电网进行智能互动的灵活负载。在算力中心部署智能能源管理系统（EMS），实时监测IT负载、制冷系统、储能装置、本地绿电设施等的运行状态。基于AI算法预测并调度工作负载，在绿电充沛、电价较低的时段加大计算任务处理量，同时动态优化制冷策略以降低功耗；在绿电不足或电网供应紧张时，适度削减非紧急任务、启用储能设备，保障关键负载运行，以平滑用电曲线、降低对传统化石能源的依赖。由此降低运营成本、减少碳排放，直接提升绿电在算力中心总能耗中的占比，加快算力中心的绿色转型。

国内外的标杆算力中心深度部署EMS，构建了“感知–决策–执行–反馈”闭环的技术体系。广州联通互联网数据中心应用了华为iCooling@AI能效优化系统[69]，依托预训练的多维度负载预测模型，将智能EMS与本地分布式光伏电站的出力曲线进行毫秒级联动，可提前1 h预判午间光伏大发时段的绿电供应峰值。整合IT负载、制冷设备、光伏出力等多源异构数据，打破了传统算力设施与电力系统的“数据孤岛”，解决了状态感知、协同决策的连通瓶颈。在决策执行层面，可自动触发IT集群的任务调度机制，优先将批处理计算、数据备份等非实时任务分配至空闲算力节点，以最大化承接绿电资源；基于机房内30个核心传感器采集的冷通道温/湿度、气流压力等动态数据，应用AI算法实时调节冷机群负载与风机频率，使制冷系统能耗与绿电供应节奏适配。该数据中心全年绿电消纳量提升18%，年度节约电力1.324×10^7 kW·h，灵活

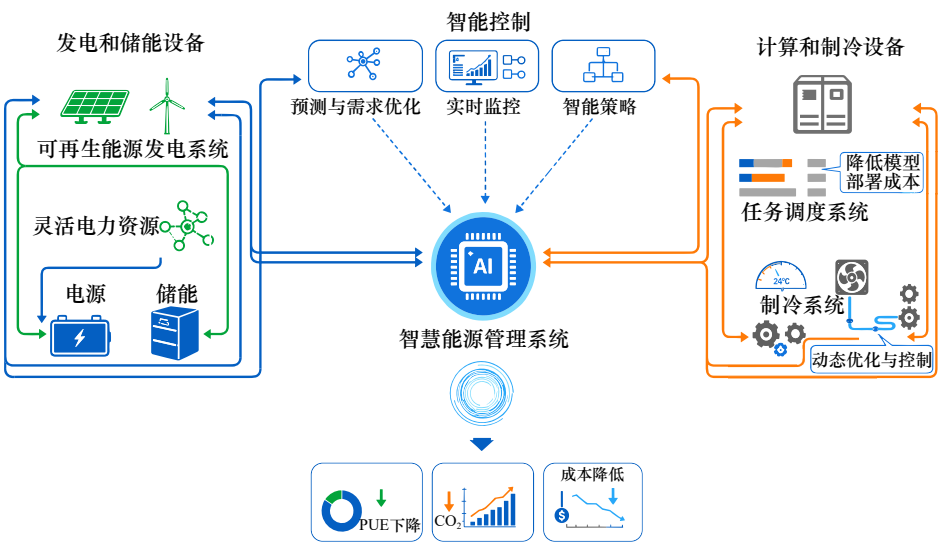


图3　单元级算电协同过程

负载响应能力使电网峰谷时段用电波动幅度降低23%[69]。

商汤临港智算中心部署了算电协同平台，应用能源大模型将绿电预测准确率提升至88%[70]，可精准识别云层遮挡、短时阵风等导致的绿电出力骤降风险，贯通了感知、决策等关键环节。算电协同平台采用的调控策略为：在绿电充沛时段，应用动态负载调度算法将1 MW电力产出的有效算力从行业均值的200 P提升至350 P，并与储能装置联动（以充电方式消纳冗余绿电）；当绿电供应出现缺口时，通过算力优先级排序机制优先保障AI训练与核心业务负载的稳定运行，再对非核心算力资源实施动态降频或关停，辅以储能系统放电，确保用电曲线的平滑过渡。相关工程实践使智算中心的绿电占比稳定维持在32%，也将年度PUE优化至1.28的超低水平[70]，验证了单元级场景下算力柔性调节与储能联动来破解物理基础矛盾的有效性。

（二）链路级协同

链路级协同围绕连接算力与电力节点的核心通道（电力通信网），为未来的全国一体化算力调度构建高速、可靠、智能的数据传输路由。电力系统自身拥有覆盖全国、深入基层的专用通信网络，主要承载电网控制、保护、监测等关键业务。在算电协同框架下，链路级协同的核心任务是对电力通信网的资源进行高效整合与智能化升级，以承载东西部地区数据中心之间的海量数据迁移、备份、渲染等算力任务流量，支撑全国范围内算力资源的高效流动。

结合当前的算电协同行业进展看，链路级协同尚未形成真正落地的应用案例，发展滞后的原因在于技术适配不足、标准体系缺位。在技术适配层面，电力通信网采用同步数字体系/准同步数字体系协议架构，主要面向电网安全稳定控制业务，具有硬实时性设计的特点，并不适应算力迁移场景对弹性带宽调度、突发流量承载的需求。虽有企业探索将5G网络切片应用于电力场景，但研究局限于电网业务优化，并未延伸至电力信号与算力指令一体化传输的综合场景。在算电协同技术兼容性方面仍未形成可靠的解决方案。在标准体系层面，缺乏统一的算电协同链路资源调度规范，涉及电力通信网的资源归属界定、算力传输优先级划分等核心技术标准均未明确，标准空白直接制约企业开展规模化算电协同实践的可行性。整体上，链路级协同处于从概念验证向工程落地过渡的筹备阶段，有待技术突破、标准建立、场景需求等方面的共同助力才能促进全面发展。

（三）区域级协同

区域级协同将发展视野扩展至地理区域内多个算力中心构成的集群，着力打破算力与电力系统在区域范围内的管理壁垒，构建统一调度、弹性响应的资源共同体（见图4）；可视为在单元级协同的基础上，进一步破解物理基础挑战、使能技术挑战的实践场景。在实时感知并分析区域内算力负载、清洁能源发电、电网运行状态等信息的基础上，对可迁移的算力任务进行时空再分配，引导计算任务向绿电充沛的时段与节点集中，同时利用规模化储能设施开展能源充裕时储电、算力高峰时放电。运用区域级协同机制，将原本各个算力中心独立配置的冗余电力保障整合为区域层面共享共用的弹性资源池，不仅能够降低单点设施的冗余电力投资与运维成本，而且可以提升清洁能源的就地消纳率与区域整体能效。

上海临港算力中心集群聚集了8座大型算力中心，依托上海市虚拟电厂运营管理平台的专属模块，建立了“电力调度–算力迁移–碳排放监测”一体化的协同机制[71]。在电网用电高峰时段，接收到电网调峰指令后仅用3 min便将临港某智算中心的AI推理任务平稳迁移至位于湖北省十堰市的算力节点；在区域尺度上将分散的弹性算力资源整合为可统一调度的虚拟调节资源，再以负荷迁移的模式，化解了刚性电网与弹性算力的根本性矛盾。在调度过程中，系统通过400 G全光链路将数据传输时延控制在20 ms以内，实时计算迁移后临港算力中心集群的负荷削减量、绿电消纳比例；单次调峰响应可削减4 MW用电负荷，相当于为区域电网新增1座小型调峰电站。这种算力调度与电力调峰的深度耦合，不仅验证了算力作为可调节资源的可行性，更是走通了区域级协同服务新型电力系统的实施路径。

（四）全局级协同

全局级协同是最高层次的算电协同愿景，追求

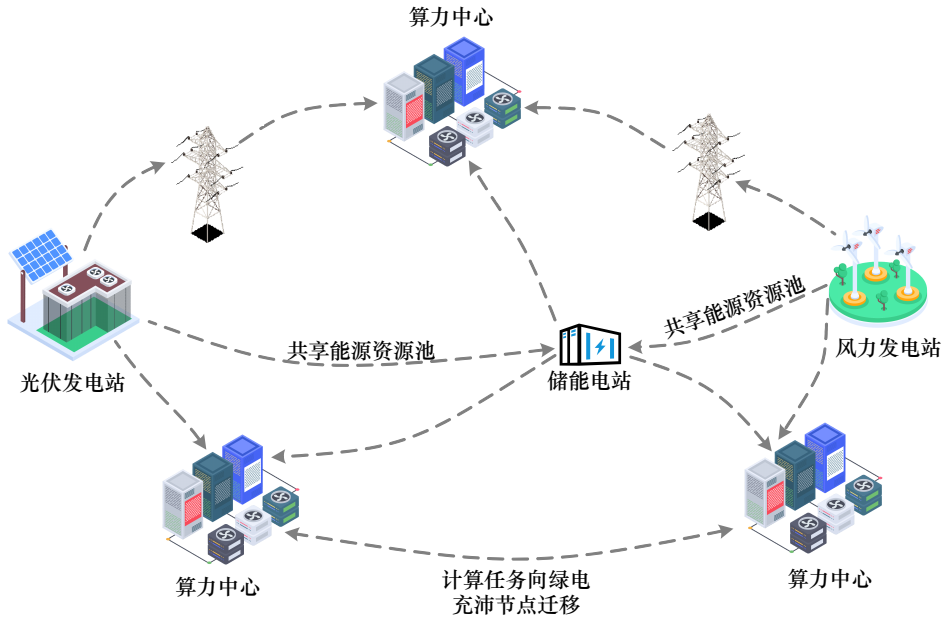


图4　区域级算电协同过程

算力网、电力网在国家层面的融合运行，支持电力资源、算力资源在超大空间尺度上的协调与互济。这意味着两类基础设施网络不再独立规划和运营，而是作为一个整体进行调度和优化。在此场景下，国家级算力调度平台、电力调度平台将进行数据互通和联合决策：后者将全网的电价信号、新能源预测、网络拥堵情况等信息实时共享给前者；前者根据实时共享信息，引导计算任务向电力充足、绿电比例高的节点流动。此外，当电网出现波动、需要削减负荷时，算力网可以作为良好的柔性负荷资源，以暂时关停部分可中断计算任务的方式响应电网需求并为电网提供调峰服务。

中国南方电网有限责任公司建立的“电碳算”协同运营系统代表了我国算电协同全局级协同的实践进展[60]，采用确定性网络技术接入全国一体化算力网，构建了国家级电力调度平台、算力调度平台的双向数据互通及联合决策体系；研发了电算耦合计量表、“算–电–碳”映射模型，支持算力任务、电力资源的精准量化匹配，为市场机制落地提供了基础能力支撑；与全国统一电力市场深度联动，可实时获取全网出清电价、新能源出力预测、电网负荷状态等数据。在广东省、贵州省、江苏省三地跨域调度测试中，通过电价信号引导了约 500 kW·h 智算任务从广东省的高峰时段转移至贵州省的低电价区域，实现电费降低 36%，同步提高了绿电消纳比例。应用电碳协同监测机制，生成算力任务全流程碳足迹画像，通过绿电绿证交易开展碳排放跨域溯源与互认，为绿色溢价的产生与传导提供了载体。在电网负荷高峰时段，引导非核心算力任务关停以释放柔性调节资源，探索了算力参与电网辅助服务的收益路径。

五、算电协同的发展趋势

算力网络、电力网络作为支撑数字社会、清洁能源转型的关键基础设施而呈现紧密关联性，但二者在技术体系、运营模式、监管框架上长期独立发展构成了融合发展的现实挑战。算电协同的未来演进并非追求机械式的系统合并，而是在保持核心系统独立性、安全性的前提下，通过架构耦合、技术使能、机制创新、生态培育，逐步实践从信息互通到业务协同再到生态融合的螺旋式上升路径。

（一）架构演进：发展“通算能”融合的泛在智慧基础设施

未来城市与数字社会的基础将不再是各自独立的通信网、电力网、计算中心，而是三方面融合形成的“通算能”一体化基础设施。这一演进并非追求通信网、电力网、计算中心在物理层的硬性整合，

而是在保持各自网络架构独立性并继续实施专业管控的前提下，通过标准化接口和协同平台推进逻辑与资源层面的深度耦合。基础设施的节点将演化为具备多维状态感知、信息交互能力的智能体，形成分布式、可调度的虚拟资源池。由此打破传统基础设施功能单一的局限，将信息的获取、处理以及能量的传递融为一体，进而以极高的综合能效支撑全域自动驾驶、大规模数字孪生等未来社会应用场景。

（二）技术突破：构建全局–边缘协同的算电一体化调度引擎

加快调度层面的技术突破，构建全局–边缘协同的算电一体化调度引擎，促成算力与电力资源的高效匹配。以电力系统数字孪生、算力意图感知为核心功能，构建全局优化框架，以实时解析电网拓扑、潮流分布、可再生能源波动，精准识别异构计算任务的能耗特征、时序约束、可中断特性。建立算力负荷柔性可调度模型，将异构分布式计算任务抽象为具有时空可调特性的虚拟储能资源，构成细粒度的电网可调度单元。引入多目标智能决策机制，塑造算力负载的时空功率，以动态追踪可再生能源出力，将原本无序的算力高峰转化为支撑电网稳定、促进绿电消纳的智慧柔性负载。以算电两网资源在调度层面的闭环互动与价值最大化，驱动形成算力与电力双向耦合、动态均衡的协同新范式。

（三）机制创新：建立算电一体化市场激励机制与标准体系

算电协同的可持续发展依赖以机制创新激活系统内生动力，需要构建可精准刻画“算电碳”综合价值的先进市场形态。基于区块链的分布式自治组织与智能合约，将逐步承担算力任务与绿色电力份额的自动匹配及点对点交易，形成可编程、可组合的“算电商品”。激励机制将从单一的经济补贴方式，演进为融合绿色电力消费凭证、碳足迹积分、算力贡献度的多元化激励模型，让参与方在多维协同中获得复合收益。可优先建立覆盖资源度量、市场交易、系统互操作、安全与隐私保护的标准体系，将之作为技术互联的基础、构建算电统一市场的前提，为算力与能源作为新型数字商品的自由流通提供必要支撑。

（四）生态重构：打造算电协同的宏观政策支撑环境

算电协同的规模化落地既取决于单点技术突破，又依赖稳定、可预期的宏观政策与产业环境。建议由国家相关主管部门联合，牵头制定分阶段、可操作的国家级发展战略与实施路线图，明确从信息互通到业务协同再到生态融合的演进路径；健全跨部门协调机制，打破算力与电力行业之间的管理壁垒。设立国家级算电协同重点研发项目，集中攻关跨系统协同调度、高精度联合仿真、安全互操作协议等关键技术。优先在“东数西算”国家枢纽节点、新型电力系统示范区部署集成应用示范工程，形成可复制、可推广的系统解决方案与商业模式，加速创新成果的规模化应用。建立科学的监管与评估体系，对算电服务全链条的能效、碳效、安全性、经济性等进行动态监测与可信评估，为系统长期稳健运行与持续优化提供制度保障，促进生态效能的长效发挥。

六、结语

算电协同是衔接数字经济、能源转型的关键枢纽，发展质量事关“双碳”目标推进、算力基础设施可持续升级。本文面向算电协同这一复杂系统工程，阐释了在破解算力设施能耗增长、电力系统低碳转型双重困境方面的核心价值，提出了贯穿全生命周期的体系框架与分层功能架构，分析了关键技术体系，厘清了由四级场景构成的应用生态，讨论了架构、技术、机制、生态等方面的发展趋势。相关内容具有现实性、系统性、前瞻性，显现了算电协同的战略价值与发展方向。

着眼中长期发展，算电协同领域还需持续探索应用、攻克关键技术。突破异构算力跨架构、跨厂商的统一度量及建模等技术难点，支撑弹性功耗管理、多能互补调度的一体化协同优化。推动数字孪生与大模型、边缘AI的深度耦合，提升算电协同系统的动态感知能力、前瞻决策精度。发展“算电碳”动态边际价值核算模型与多边智能合约技术，解决绿色价值传导与利益协调难题。以技术突破和创新应用为重点，推动算力和电力系统从局部协同迈向全局智能耦合，保障算电一体化健康发展。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 2, 2025; **Revised date:** January 13, 2026

Corresponding author: Liu Yongmei is a professor from the Business School, Central South University. Her major research fields include artificial intelligence, energy management, and decision-making theories and methods. E-mail: ym_liu07@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project "Research on the strategic layout and implementation path of future key industries to promote the development of new productive forces" (2025-XBZD-14); The National Natural Science Foundation of China Project (72088101); Xiangjiang Laboratory Project (24XJ01001)

参考文献

[1] Softbank Group. Announcing the stargate project[EB/OL]. (2025-01-21)[2026-01-05]. https://group.softbank/en/news/press/20250122.

[2] European Commission. The AI continent action plan[EB/OL]. (2025-04-09)[2026-01-05]. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-continent-action-plan.

[3] 陈晓红，曹廖滢，陈姣龙，等. 我国算力发展的需求、电力能耗及绿色低碳转型对策[J]. 中国科学院院刊，2024，39(3)：528-539.
Chen X H，Cao L Y，Chen J L，et al. Development demand，power energy consumption and green and low-carbon transition for computing power in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2024，39(3)：528-539.

[4] 中国信息通信研究院. 算力电力协同发展研究报告[R]. 北京：中国信息通信研究院，2025.
China Academy of Information and Technology Communications. Research report on the collaborative development of computing power and electric power (2025)[R]. Beijing：China Academy of Information and Communications Technology，2025.

[5] 谢人超，胡珉昊，唐琴琴，等. 面向绿色计算的算网能一体化：架构、关键问题与挑战[J]. 通信学报，2025，46(8)：205-224.
Xie R C，Hu M H，Tang Q Q，et al. Integration of computing network energy for green computing：Architecture，key issues and challenges[J]. Journal on Communications，2025，46(8)：205-224.

[6] 管晓宏，徐占伯，吴江，等. 数字基础设施绿色低碳发展中的关键科学问题与建议[J]. 中国科学基金，2024，38(4)：583-592.
Guan X H，Xu Z B，Wu J，et al. Emerging topics in the green and low-carbon development of digital infrastructure[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2024，38(4)：583-592.

[7] Guo C S，Luo F J，Cai Z X，et al. Integrated energy systems of data centers and smart grids：State-of-the-art and future opportunities[J]. Applied Energy，2021，301：117474.

[8] 李林虹，贺帅佳，高红均，等. 考虑能源站－变电站－数据中心站多站融合的配电网低碳规划方法[J/OL]. 电网技术，2026-01-05. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1934.
Li L H，He S J，Gao H J，et al. A low-carbon planning method for distribution network considering multi-station integration of energy station，substation and data center[J/OL]. Power System Technology，2026-01-05. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1934.

[9] 陈心拓，周黎旸，张程宾，等. 绿色高能效数据中心散热冷却技术研究现状及发展趋势[J]. 中国工程科学，2022，24(4)：94-104.
Chen X T，Zhou L Y，Zhang C B，et al. Research status and future development of cooling technologies for green and energy-efficient data centers[J]. Strategic Study of CAE，2022，24(4)：94-104.

[10] Ye Z S，Gao W，Hu Q H，et al. Deep learning workload scheduling in GPU datacenters：A survey[J]. ACM Computing Surveys，2024，56(6)：1-38.

[11] 周京华，王江博. 数据中心供电架构概述与展望[J/OL]. 电源学报，2023-10-26. https://doi.org/10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.289.
Zhou J H，Wang J B. Overview and prospect of data center power supply architecture[J/OL]. China Industrial Economics，2023-10-26. https://doi.org/10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.289.

[12] Liu T H，Yan R J，Zhang J，et al. Harnessing dynamic carbon intensity for energy-data co-optimization in Internet data centers[J]. Renewable Energy，2026，256：124626.

[13] 陈敏，高赐威，郭庆来，等. 互联网数据中心负荷时空可转移特性建模与协同优化：驱动力与研究架构[J]. 中国电机工程学报，2022，42(19)：6945-6957.
Chen M，Gao C W，Guo Q L，et al. Modeling and coordinated optimization for spatiotemporal load regulation potentials of Internet data centers：Motivation and architecture[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(19)：6945-6957.

[14] 李明睿，朱介北，俞露杰，等. 实现新能源最大利用的多数据中心自适应负荷调度算法[J]. 中国电机工程学报，2025，45(6)：2071-2083.
Li M R，Zhu J B，Yu L J，et al. Adaptive spatio-temporal tasks scheduling algorithm in regional interconnected data centers[J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(6)：2071-2083.

[15] Rosca C M，Stancu A. Integration of AI in self-powered IoT sensor systems[J]. Applied Sciences，2025，15(13)：7008.

[16] Announcing project Horizon：Why we're building a 2 gigawatt AI campus in Texas[EB/OL]. (2025-10-15)[2026-01-05]. https://poolside.ai/blog/announcing-project-horizon.

[17] Hemphill T A. US AI data centers and deployment challenges for small modular reactors：Proposed regulatory policy recommendations[J]. Science and Public Policy，2024，51(5)：999-1003.

[18] Agrawal R. The digital power problem[R]. New York：Kohlberg Kravis Roberts，2024：10.

[19] International Energy Agency. Overcoming energy constraints is key to delivering on Europe's data centre goals[EB/OL]. (2025-11-16)[2026-01-05]. https://www.iea.org/commentaries/overcoming-energy-constraints-is-key-to-delivering-on-europe-s-data-centre-goals.

[20] EPRI Europe. EPRI's data center flexibility and grid reliability initiative expands to Europe[EB/OL]. (2025-02-25)[2026-01-05]. https://europe.epri.com/press-releases/epris-data-center-flexibility-and-grid-reliability-initiative-expands-europe.

[21] Pék G，Buttyán L，Bencsáth B. A survey of security issues in hardware virtualization[J]. ACM Computing Surveys，2013，45(3)：1-34.

[22] Kozhirbayev Z，Sinnott R O. A performance comparison of container-based technologies for the cloud[J]. Future Generation

Computer Systems，2017，68：175-182.

[23] Wan X L，Guan X J，Wang T J，et al. Application deployment using microservice and docker containers：Framework and optimization[J]. Journal of Network and Computer Applications，2018，119：97-109.

[24] Urblik L，Kajati E，Papcun P，et al. Containerization in edge intelligence：A review[J]. Electronics，2024，13(7)：1335.

[25] Goethals T，De Turck F，Volckaert B. Extending Kubernetes clusters to low-resource edge devices using virtual kubelets[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing，2022，10(4)：2623-2636.

[26] Ecker W，Müller W，Dömer R. Hardware-dependent software[M]. Dordrecht：Springer Netherlands，2009：74.

[27] Xu S，Huang Z X，Zeng Y，et al. HETHUB：A distributed training system with heterogeneous cluster for large-scale models[PP/OL]. arXiv（2024-08-09）[2026-01-05]. https：//doi. org/10.48550/arXiv.2405.16256.

[28] Tang D，Zhou J C，Hu J K，et al. H2：Towards efficient large-scale LLM training on hyper-heterogeneous cluster over 1000 chips[PP/OL]. arXiv（2025-05-23）[2026-01-05]. https：//doi.org/10.48550/arXiv.2505.17548.

[29] Chu R C，Simons R E，Ellsworth M J，et al. Review of cooling technologies for computer products[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability，2004，4(4)：568-585.

[30] Wu Z J，Zhang G Y，Lu S A，et al. A comprehensive review of cold plate liquid cooling technology for data centers[J]. Chemical Engineering Science，2025，310：121525.

[31] Wu Z H，Xiao W，He H Y，et al. Jet-enhanced manifold microchannels for cooling electronics up to a heat flux of 3000 W/cm^2[J]. Nature Electronics，2025，8(9)：810-817.

[32] Thakur P，Kumar Sehgal V. Emerging architecture for heterogeneous smart cyber-physical systems for industry 5.0[J]. Computers & Industrial Engineering，2021，162：107750.

[33] 王天宇，李根生，宋先知，等. “风光热储”多能协同的智慧油气田发展研究[J]. 中国工程科学，2024，26(4)：259-270.
Wang T Y，Li G S，Song X Z，et al. Development of smart oil and gas fields with multi-energy synergy of wind，solar，geothermal，and energy storage[J]. Strategic Study of CAE，2024，26(4)：259-270.

[34] 王菲菲. 中国联通与天合光能三江源绿电智算融合示范[N]. 青海日报，2025-04-30(1).
Wang F F. Demonstration of integration of China Unicom and Trina Solar’s Sanjiangyuan green power smart computing[N]. Qinghai Daily，2025-04-30(1).

[35] 可思为，董萍，马铭宇，等. 考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(22)：22-33.
Ke S W，Dong P，Ma M Y，et al. A multi-objective allocation method for multi-energy green data centers considering wind，solar and load spatial-temporal complementarity[J]. Power System Protection and Control，2024，52(22)：22-33.

[36] Han T，Wang Y Z，Mi Z F，et al. Designing and regulating clean energy data centres[J]. Nature Reviews Clean Technology，2025，1(6)：373-374.

[37] Fan J L，Huang X，Shi J，et al. Complementary potential of wind-solar-hydro power in Chinese provinces：Based on a high temporal resolution multi-objective optimization model[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2023，184：113566.

[38] 刘金朋，胡国松，彭锦淳，等. 多能互补的虚拟电厂低碳–经济–鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报，2024，44(24)：9718-9730.
Liu J P，Hu G S，Peng J C，et al. Low-carbon economic-robust optimization scheduling of multi-energy complementary virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(24)：9718-9730.

[39] 厉松芮，朱春旭，张立辉，等. 农村清洁能源多能互补系统多主体协同运行优化模型[J]. 系统工程理论与实践，2026，46(2)：521-537.
Li S R，Zhu C X，Zhang L H，et al. An optimization model for the multi-subject collaborative operation of rural clean energy multi-energy complementary system[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2026，46(2)：521-537.

[40] 李彤，徐都玲，吴波，等. 广域确定性网络传输技术综述[J]. 软件学报，2025，36(1)：371-398.
Li T，Xu D L，Wu B，et al. Survey on transmission technology in wide area deterministic networking[J]. Journal of Software，2025，36(1)：371-398.

[41] 洪伟，余超，陈继新，等. 5G及其演进中的毫米波技术[J]. 微波学报，2020，36(1)：12-16.
Hong W，Yu C，Chen J X，et al. Millimeter wave technology for 5G and beyond[J]. Journal of Microwaves，2020，36(1)：12-16.

[42] 韩笑天，聂文超，李鹏，等. 水下无线光通信的研究现状与发展趋势分析[J]. 光学学报，2025，45(13)：1306016.
Han X T，Nie W C，Li P，et al. Research status and development trends analysis of underwater wireless optical communication(invited)[J]. Acta Optica Sinica，2025，45(13)：1306016.

[43] 刘延飞，王程锦，李超. 基于强化学习的软件定义网络流量工程研究综述[J]. 计算机工程与应用，2025，61(24)：1-28.
Liu Y F，Wang C J，Li C. Survey on traffic engineering in software-defined networking based on reinforcement learning[J]. Computer Engineering and Applications，2025，61(24)：1-28.

[44] Xu D L，Li T，Li Y，et al. Edge intelligence：Empowering intelligence to the edge of network[J]. Proceedings of the IEEE，2021，109(11)：1778-1837.

[45] Hu S J，Lu Z H，Xu X，et al. LAECIPS：Large vision model assisted adaptive edge-cloud collaboration for IoT-based embodied intelligence system[PP/OL]. arXiv（2025-06-19）[2026-01-05]. https：//doi.org/10.48550/arXiv.2404.10498.

[46] Dantas P V，Sabino da Silva W，Cordeiro L C，et al. A comprehensive review of model compression techniques in machine learning[J]. Applied Intelligence，2024，54(22)：11804-11844.

[47] Baldassarre L，Li Y H，Scarlett J，et al. Learning-based compressive subsampling[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing，2016，10(4)：809-822.

[48] Wang C H，Huang K Y，Yao Y，et al. Lightweight deep learning：An overview[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine，2024，13(4)：51-64.

[49] 北京邮电大学. 算电协同技术白皮书[R]. 北京：北京邮电大学，2025：30.
Beijing University of Posts and Telecommunications. White paper

on computing-electrical synergy technology[R]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025: 30.

[50] Sun Y C, Zhang Q, Bao J S, et al. Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 74: 83-99.

[51] Abid A, Lee J, Le Gall F, et al. Toward mapping an NGSI-LD context model on RDF graph approaches: A comparison study[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4798.

[52] Nicoletti B, Appolloni A. A digital twin framework for enhancing human-agentic AI-machine collaboration[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2026, 37(5): 2165-2181.

[53] Jayanetti A, Halgamuge S, Buyya 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.

[54] 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.

[55] Yang J L, Saad Z, Wu J J, et al. A survey on task scheduling in carbon-aware container orchestration[PP/OL]. arXiv (2025-08-08)[2026-01-05]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.05949.

[56] Yuan H T, Bi J, Zhang J, et al. Energy consumption and performance optimized task scheduling in distributed data centers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(9): 5506-5517.

[57] Demirbaga U. EcoCloud: Green computing through energy and carbon efficient task scheduling in industrial IoT-enabled cloud environments[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(17): 34644-34652.

[58] Zhou X Y, Dall'Anese E, Chen L J. Online stochastic optimization of networked distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(6): 2387-2401.

[59] 黎海涛，乔禄，谢冬雪，等. 基于纳什竞争深度Q网络的综合能源微网电－热－碳联合调度策略[J]. 电力自动化设备，2026，46(4)：103-111.
Li H T, Qiao L, Xie D X, et al. Nash-dueling deep Q network based electricity–heat–carbon joint dispatch strategy of integrated energy microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(4): 103-111.

[60] 南方电网发布电碳算协同运营系统 为用户提供“算力淘宝”式服务[EB/OL]. (2025-09-04)[2026-01-05]. http://ysp.net.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c34357391/content.html.
China Southern Power Grid releases electricity and carbon calculation collaborative operation system, providing users with “computing power Taobao” type services[EB/OL]. (2025-09-04)[2026-01-05]. http://ysp. net. sasac. gov. cn/n2588025/n2588124/c34357391/content.html.

[61] 郭庆来，陈敏，王奕. 算力电力协同：思路与探索白皮书(2025)[R]. 北京：清华大学，2025：11-12.
Guo Q L, Chen M, Wang Y. Computing power and electricity collaboration: Ideas and exploration white paper (2025)[M]. Beijing: Tsinghua University, 2025: 11-12.

[62] 王瑞，程杉，汪业乔，等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(5)：12-21.
Wang R, Cheng S, Wang Y Q, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 12-21.

[63] 王学杰，赵会茹，曹艺琼，等. 基于随机Nash-Harsanyi讨价还价博弈的光伏－氢储能多主体分散协同调度[J]. 电工技术学报，2024，39(9)：2652-2666.
Wang X J, Zhao H R, Cao Y Q, et al. Photovoltaic-hydrogen energy storage multi-agent decentralized cooperative scheduling based on stochastic Nash-Harsanyi bargaining game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2652-2666.

[64] Chen Q G, Wu D N, Chen L, et al. Research on the traceability mechanism of green electricity consumption in the electricity market[C]//2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), 2023: 2022CP0151.

[65] Zhang Q, Xu T, Wang D, et al. Study of traceability system of renewable energy power trading based on blockchain technology[C]//2022 International Conference on Blockchain Technology and Information Security (ICBCTIS), 2022, 171-176.

[66] 贺勇，乔栋. 青海开辟绿色算电协同发展新赛道[N]. 人民日报，2025-06-22(1).
He Y, Qiao D. Qinghai Province opens up a new track for the collaborative development of green computing and electricity[N]. People's Daily, 2025-06-22(1).

[67] Himeur Y, Alsalemi A, Bensaali F, et al. Recent trends of smart nonintrusive load monitoring in buildings: A review, open challenges, and future directions[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2022, 37(10): 7124-7179.

[68] 凡航，徐葳，范晓昱，等. 隐私计算在新型电力系统中的应用分析与展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(19)：187-199.
Fan H, Xu W, Fan X Y, et al. Application analysis and prospect of privacy-preserving computation in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 187-199.

[69] 节能有道，华为数据中心能源助力广州联通IDC绿色化改造[EB/OL]. (2023-09-11)[2026-01-05]. https://digitalpower.huawei.com/cn/cases/data-center-facility/china-unicom-eco-friendly-data-centers.
Energy conservation is crucial, and Huawei's data center energy solutions are empowering Guangzhou Unicom's IDC green transformation[EB/OL]. (2023-09-11)[2026-01-05]. https://digitalpower.huawei.com/cn/cases/data-center-facility/china-unicom-eco-friendly-data-centers.

[70] 罗云鹏. 商汤大装置等联合发布“算电协同平台”[N]. 科技日报，2025-07-30(5).
Luo Y P. SenseTime and other major devices jointly launched the “computing and electricity collaboration platform”[N]. Science and Technology Daily, 2025-07-30(5).

[71] 查睿. 上海首次验证“算电协同”新模式 3分钟跨越千里[N]. 解放日报，2025-07-10(2).
Cha R. Shanghai verifies the new “computing-electricity synergy” model for the first time, spanning thousands of miles in just 3 minutes[N]. Jiefang Daily, 2025-07-10(2).