

未来网络技术发展系列白皮书（2025）

算电协同技术 白皮书

第九届未来网络发展大会组委会

2025年8月

版权声明

本白皮书版权属于北京邮电大学、紫金山实验室所有并受法律保护，任何个人或是组织在转载、摘编或以其他方式引用本白皮书中的文字、数据、图片或者观点时，应注明“**来源：北京邮电大学、紫金山实验室等**”。否则将可能违反中国有关知识产权的相关法律和法规，对此北京邮电大学、紫金山实验室有权追究侵权者的相关法律责任。

编写说明

主编单位：

北京邮电大学、紫金山实验室

参编单位：

国网山东省电力公司信息通信公司、国网山东省电力公司青岛供电公司

江苏省未来网络创新研究院、江苏方天电力技术有限公司

中国电力科学研究院有限公司、中国联合网络通信有限公司研究院

指导专家：

刘韵洁 黄 韬 张 鑫 谢人超 田 鹏 王 勇 蒲天骄 曹 畅
邢宏伟 李 勇 李 明 李 宁 严 莉 陈 琛 魏 亮

参编人员：

唐琴琴 贾庆民 文 雯 李 硕 孙思齐 李敏宽 张 岩 牛德玲
王云霄 黄 华 刘子雁 刘 学 王新惠 于文洁 程 辉 韩 然
侯 路 汪 洋 王晓辉 吴春鹏 王子涵 黄 祥 吴 媚 贾雪琴
汪 硕 刘 辉 王立文 邵子豪 王志浩 王文正 徐宏亮 谢高畅
沈 薇

前 言

在数字经济与能源革命深度融合的时代背景下，算力与电力的协同发展正面临前所未有的机遇与挑战。随着 5G、人工智能、工业互联网等新一代信息技术的迅猛发展，全球算力需求呈现爆发式增长，2023 年我国算力总规模已达 230EFLOPS，智能算力增速高达 45%。然而，这种增长也带来了严峻的能源问题，全国数据中心年耗电量突破 1500 亿千瓦时，占全社会用电量的 1.6%，单次 AI 大模型训练的能耗相当于数百个家庭年用电量。与此同时，我国电力系统正在经历深刻变革，新能源装机占比已突破 50%，但“弃风弃光”与东部电力短缺并存的结构性矛盾日益凸显。这种算力需求激增与能源转型的双重压力，使得构建高效、低碳的算电协同体系成为实现“双碳”目标的关键路径。

当前算电协同发展面临诸多现实挑战。在资源匹配方面，算力基础设施主要集中在东部负荷中心，依赖化石能源供电，而西部新能源富集区却面临算力需求不足的问题，影响了绿电的消纳。在系统协同层面，算力调度以性能优化为导向，电力系统则以稳频调峰为目标，二者缺乏统一的优化框架，造成新能源利用率损失 3%-5%。技术层面，算力系统的异构性与电力系统的波动性难以通过传统控制模型实现兼容，跨域协同效率低下。这些问题的存在严重制约了算力产业与能源系统的协同发展。

本白皮书详细介绍了算电协同的发展背景、基本概念、功能架构、关键使能技术等；同时，分析了算电协同典型应用场景、生态

建设，并探讨了算电协同面临的技术挑战和未来发展方向。我们期待本白皮书能够为政产学研各界提供系统性参考，推动算力网络与新型电力系统从简单叠加走向深度融合，最终实现“绿色算力赋能数字经济，高效能源驱动算力革命”的美好愿景。

第九届未来网络发展大会白皮书

目 录

一、算电协同发展背景	1
1.1 技术业务发展，驱动算力电力协同变革	1
1.2 国家政策规划，推动算力绿色低碳转型	3
1.3 行业实践进展，加速算力电力协同创新	5
1.4 算电协同愿景，构建比特与瓦特的智能闭环	8
二、算电协同功能架构及关键使能技术	11
2.1 算电协同功能架构	11
2.2 算电协同关键使能技术	14
2.2.1 多元异构算力适配纳管	15
2.2.2 多能互补电力协同调度	16
2.2.3 算电协同感知模型构建	17
2.2.4 高可靠确定性网络承载	18
2.2.5 生成式智能化决策控制	19
2.2.6 全周期高实时数字孪生	22
2.2.7 多要素高可信算电交易	24
三、算电协同典型应用场景	26
3.1 算随电调，助力电力新能源消纳	26
3.2 电随算用，满足算力新负荷需求	29
四、算电协同生态建设	33
4.1 电力侧发展与绿色转型	33
4.1.1 优化可再生能源供给体系	33
4.1.2 完善供需动态平衡机制	35
4.1.3 提升算力产业支撑能力	35
4.2 算力侧规划与能源协同	37
4.2.1 规划与布局算力基础设施	37
4.2.2 构建算力-电力接口技术	38
4.3 平台侧建设与功能优化	40
4.4 用户侧协同与服务创新	42
4.4.1 推进需求侧响应模式	42
4.4.2 创新算力能源交易模式	44

五、技术挑战与未来方向	47
5.1 技术挑战	47
5.1.1 系统复杂性，算电协同的纳管挑战	47
5.1.2 资源动态匹配，协同控制的核心难题	48
5.1.3 能效瓶颈，电力侧的关键制约	48
5.1.4 安全与可靠性，交易机制的基础挑战	49
5.2 未来发展方向	50
5.2.1 智能调度技术从单目标优化迈向多模态协同，推动算力网 络向全域资源动态匹配演进	50
5.2.2 绿色计算技术从能效提升转向全生命周期减碳，零碳数据 中心架构加速普及	51
5.2.3 边缘计算与微电网从独立部署走向深度耦合，构建区域性 能电自平衡单元	52
5.2.4 政策体系从单一激励升级为多维生态构建，算力-电力协同 治理框架初步成型	53
5.2.5 量子计算与 AI 大模型赋能调度系统，突破传统优化算法 的算力瓶颈	54
5.3 算力电力协同发展建议	55
参考文献	58

一、算电协同发展背景

随着全球数字经济与能源革命的深度融合，算力与电力的协同发展已成为推动“双碳”目标实现的关键路径。本章将从技术业务发展、国家政策规划、行业实践进展和协同愿景四个维度，系统阐述算电协同发展背景与战略意义，为后续章节的技术架构与应用场景奠定基础。

1.1 技术业务发展，驱动算力电力协同变革

随着全球数字经济进入高速发展阶段，算力已成为继热力、电力之后的新型生产力，在人工智能、元宇宙、工业互联网、自动驾驶等前沿领域发挥着关键作用。据中国信通院统计，2023 年我国算力总规模达到 230EFLOPS，同比增长约 35%，其中智能算力增速更是高达 45%，显示出强劲的发展势头。然而，算力产业的爆发式增长也带来了巨大的能源消耗问题。以数据中心为例，2023 年全国数据中心用电量突破 1500 亿千瓦时，占全社会用电量的 1.6%，相当于三峡电站全年发电量的 1.5 倍。更值得关注的是，随着大模型技术的快速发展，单次训练能耗屡创新高——OpenAI 的 GPT-3 模型训练耗电达 128.7 万千瓦时，相当于 430 个家庭一年的用电量；而 GPT-4 的能耗预计是前者的 3-5 倍。

与此同时，我国电力系统正经历深刻变革，新能源装机占比已突破 50%，但消纳问题日益突出。2024 年一季度，西藏光伏利用率仅

为 68.6%，青海、甘肃等新能源大省也面临类似困境。在此背景下，算力负荷的时空可转移特性（如“东数西算”工程中的冷数据处理西迁）和灵活调节潜力（如 AI 训练任务的错峰调度）为电力系统提供了新的调节手段。研究表明，通过优化调度，全国数据中心可提供约 3000 万千瓦的灵活调节能力，相当于 30 座百万千瓦级抽水蓄能电站。此外，在“双碳”目标约束下，算力产业的绿色转型需求迫切，但目前绿电使用率仅 22% 左右，亟需建立更高效的算电协同机制。

算电协同创新发展已成为当前数字经济与能源革命深度融合的核心命题。从算力需求侧看，AI 技术爆发式增长推动全球算力规模年均增速超 30%，我国智能算力规模 2023 年达 435 EFlops，占全球 31%，但数据中心年耗电量预计 2030 年将突破 4000 亿千瓦时，占全社会用电量 4%，其中东部算力集群因绿电供给不足仍依赖化石能源，加剧碳排放矛盾。与此同时，电力系统面临新能源消纳的结构性难题：尽管我国风光发电装机超 14.5 亿千瓦（2024 年底），但间歇性、波动性导致西部“弃风弃光”与东部“缺电”并存，而算力中心的灵活负载特性可成为破解这一困局的关键——通过 AI 调度算法将非实时计算任务转移至绿电富集时段，理论上可提升新能源消纳率 15% 以上，实现“比特”与“瓦特”的时空耦合。政策层面，“东数西算”工程已明确要求 2025 年国家枢纽节点数据中心绿电占比超 80%，《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》更将算电协同列为新型基础设施建设的战略抓手，通过源网荷储一体化项目推动“大”“小”电网与算力节点的双向赋能。产业实践中，青海柴达木 100% 绿电算

力中心、阿里云张北液冷数据中心等标杆项目已验证“算力随能源跑”的可行性，但跨行业标准缺失、区域资源错配等问题仍制约协同深度，亟需通过电力市场与算力价格联动机制、虚拟电厂等技术突破构建系统性解决方案。这一变革不仅关乎单一产业，更是重塑全球竞争格局的战略支点——美国、日本已加速布局算力-绿电融合技术，而我国若能率先打通“规划-技术-市场”全链条，或将输出能源数字化转型的“中国方案”。本节通过详实的数据分析，揭示了算力产业爆发式增长带来的能源挑战与电力系统新能源消纳困境，为算电协同的必要性提供了量化依据。

1.2 国家政策规划，推动算力绿色低碳转型

在技术业务需求驱动的同时，国家层面的政策引导为算电协同提供了制度保障和发展方向。国家层面已构建起较为完善的算电协同政策体系。2021年5月，国家发改委等四部委联合印发《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，首次提出“东数西算”工程，在京津冀、长三角、粤港澳等8个地区布局国家算力枢纽节点，明确要求西部节点可再生能源使用率不低于65%。2022年2月，“东数西算”工程全面启动，规划建设10个国家数据中心集群，展望“十五五”期间，我国将进一步提升可再生能源的利用比例，到2030年，全国可再生能源消费量将达到15亿吨标煤以上。

2023年10月，工信部等六部门发布《算力基础设施高质量发展行动计划》，提出到2025年实现算力规模超过300EFLOPS、智能算

力占比达 35%、新建数据中心 PUE 低于 1.25 等具体目标。同月，国家数据局等五部门出台《关于深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》，首次将“算力电力协同”作为独立章节，要求建立算力电力协同调度机制，支持算力企业参与电力市场化交易。

2024 年，政策进一步细化落地。国家发改委《加快构建新型电力系统行动方案》提出开展“算力+电力”协同调度试点；工信部《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》要求到 2025 年新建大型数据中心 PUE 降至 1.1 以下，绿电使用率超过 50%。这些政策形成了从顶层设计到实施细则的完整体系，为算电协同发展提供了制度保障。

2025 年算电协同国家政策规划的最新进展主要体现在顶层设计的深化与试点示范的加速落地。根据《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027 年）》，算电协同被列为七大试点方向之一，明确要求在国家枢纽节点和青海、新疆等能源富集区，通过“绿电聚合供应”模式提升数据中心绿电占比，并探索算力负荷与新能源功率联合预测、柔性控制等技术，以降低电网保障容量需求。国家能源局 2025 年 5 月发布的《新型电力系统建设第一批试点通知》进一步细化实施路径，提出通过余热回收、光热发电协同等技术提升能源利用效率，并要求试点项目在 2024 年 8 月后开工，2025 年底前形成阶段性成果。

同时，《2025 年能源工作指导意见》将算电协同纳入新型电力系统建设重点任务，强调需与“东数西算”工程联动，推动国家枢纽节点数据中心绿电占比超 80% 的目标。国家数据局等五部门联合印发的《加快构建全国一体化算力网的实施意见》则提出“算力与绿色电力

一体化融合”的专项要求，计划到 2025 年底初步形成算力电力双向协同机制，并通过算力券、REITs 等政策工具支持示范项目建设。本节系统梳理了从"东数西算"工程到新型电力系统建设的政策演进，展示了我国在算电协同领域构建的完整政策体系。

表 1-1 算电协同国家政策演进表（2021-2025）

时间	政策名称	关键指标与要求
2021.05	《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》	- 西部节点可再生能源使用率≥65% - 布局 8 大国家算力枢纽节点
2023.10	《算力基础设施高质量发展行动计划》	- 算力规模≥300EFLOPS - 智能算力占比 35% - 新建数据中心 PUE<1.25
2023.12	《关于深入实施"东数西算"工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》	- 建立算力电力协同调度机制 - 支持算力企业参与电力市场化交易
2024.07	《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》	- 国家枢纽节点绿电占比 ≥80% - 新建大型数据中心 PUE≤1.25
2024.07	《加快构建新型电力系统行动方案 (2024-2027)》	- 开展“算力+电力”协同试点 - 探索"绿电聚合供应"模式 - 提升新能源消纳率 15%

如表 1-1 所示，我国算电协同政策呈现三阶段特征：2021-2022 年侧重空间布局优化，2023 年强化技术标准建设，2024 年后重点突破市场机制创新。政策也从重点考虑单节点绿电占比转向全网协同调度能力建设，体现了从局部优化到系统协同的演进路径。

1.3 行业实践进展，加速算力电力协同创新

政策引导下，行业组织、产业界和学术界正在形成协同创新的合

力，推动算电协同从理论走向实践。

行业组织与机构在算电协同领域开展了系统性工作，中国电力发展促进会于 2023 年 12 月成立电力与算力协同发展专业委员会，国家电网、南方电网、中国信通院等 20 余家单位编制《电力与算力协同发展蓝皮书（2024）》。该报告首次提出算力电力协同度评价指标体系，包含 6 个一级指标和 18 个二级指标，为行业提供了量化评估工具。中国信通院发布的《算力电力协同发展研究报告（2025 年）》则聚焦技术路径，提出“云边端协同调度”“算力负荷聚合响应”等创新模式。

产业界也取得实质性突破，2023 年 8 月，阿里巴巴与华北电力大学合作完成全球首次跨区域“算力-电力”优化调度试验，通过将杭州的 AI 训练任务迁移至内蒙古数据中心，节省电费支出 15%，减少碳排放 20%。2024 年初，腾讯联合英特尔开发出智能负载调节系统，可根据电网频率波动在 10 毫秒内完成服务器功耗调整，单数据中心可提供最大 20% 的瞬时调节能力。南方电网研发的“驭电”智能仿真大模型，通过融合气象、负荷、设备等多维数据，将新能源预测准确率提升至 95% 以上。华为在贵安建设的绿色数据中心采用“分布式光伏+液冷”技术，年均 PUE 低至 1.12；中国电信青海数据中心实现 100% 绿电供应，年减排二氧化碳 50 万吨；万国数据在上海临港试点“算力银行”模式，通过电力现货市场套利降低用能成本 8%。这些探索为算电协同的商业化推广积累了宝贵经验。2025 年，国家电网联合中国移动、阿里云等企业发起“算力电力协同创新推进计划”，推动

“源网荷储”一体化项目落地，如青海柴达木建成全球首个 100%绿电微电网算力中心，通过“自发自用”模式实现绿电消纳率超 95%。学术界则聚焦技术融合创新，清华大学团队提出“算-电-热-碳”协同理论框架，北京理工大学团队开发出基于 AI 的算力负荷动态预测模型，可优化电网调度响应速度 30%以上。

学术届也在积极推进算电协同研究，北京邮电大学未来网络团队（FNL）和紫金山实验室团队持续开展创新实践，共同推动着这一交叉学科的发展。北京邮电大学未来网络团队长期深耕网络与能源融合领域，通过构建“算力-电力-环境”三元耦合技术体系，提出了面向绿色计算的算网能一体化创新架构。该团队不仅发表了多篇发表于 IEEE JSAC、IEEE TMC 等顶级期刊的高水平论文，还成功研发了绿色算力枢纽一体化调度平台，这一成果已实际应用于中国能建“东数西算”项目，为甘肃庆阳源网荷储一体化智慧零碳大数据产业园建设提供了关键技术支撑。团队牵头制定的 9 项团体标准以及联合发布的行业首部《算网能一体化白皮书》，为行业发展提供了重要规范指导。依托国家重大科技基础设施“未来网络试验设施”（CENI），团队构建了覆盖全国 40 个城市的试验环境，为算力网络创新研究搭建了重要平台。与此同时，紫金山实验室团队在算网融合基础理论研究方面取得突破性进展，其研发的支持大规模异构算力调度的核心技术，以及建设的国家级算力网络试验平台，为行业提供了重要的技术支撑和验证环境。两个团队通过紧密的产学研合作，共同推动了我国算力电力协同领域从理论到应用的全链条创新，为“东数西算”国家战略的落

地实施奠定了坚实的学术基础和技术保障。未来，双方将继续深化在动态资源感知、跨域协同优化、可信交易机制等前沿方向的研究，共同推动构建更加绿色低碳、高效可靠的全国一体化算力网络体系。本节通过典型案例展示了产学研各界的创新实践，验证了算电协同在技术可行性和商业价值方面的巨大潜力。

1.4 算电协同愿景，构建比特与瓦特的智能闭环

基于上述技术、政策和实践基础，算电协同正在形成清晰的愿景框架和发展路径。算电协同是指以新型电力系统和全国一体化算力网为基础平台，通过技术创新、机制改革和产业融合，实现电力系统与算力基础设施在规划建设、运行调度、市场交易、技术创新等全环节的深度协同。其核心内涵可从四个维度解析：

规划协同层面，我国通过“东数西算”工程（国家发改委等，《关于深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》，2023 年 12 月）系统推进算力基础设施布局与能源资源禀赋的匹配，引导实时性要求低的算力负荷向西部新能源富集地区转移。根据国家发改委 2025 年监测数据，内蒙古、甘肃等西部枢纽节点数据中心绿电占比已达 65%（其中内蒙古和林格尔数据中心集群绿电占比达 84.57%，2025 年 5 月数据），较东部地区高出 40 个百分点，有效缓解了东部用电紧张并促进西部绿电消纳。这一协同发展模式在《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》（2024 年 7 月）和《加快构建新型电力系统行动方案（2024-2027 年）》中得到进一步强化，明确要求到

2025 年底国家枢纽节点新建数据中心绿电占比超过 80%，并通过“源网荷储”一体化等创新模式持续优化算力电力协同机制。

调度协同层面，挖掘算力负荷的灵活调节价值。包括：时间维度上，利用 AI 训练、大数据分析等可中断负荷参与需求响应；空间维度上，通过“算力漫游”实现跨区域资源调配；能效维度上，采用液冷、余热回收等技术提升能源利用效率。国网能源研究院测算，全国数据中心可调节潜力相当于当前电网灵活调节资源的 15%。

市场协同层面，构建电算融合的交易机制。包括绿电直供（如腾讯与华能合作的分布式风电项目）、容量补偿（对参与调度的算力企业给予经济激励）、碳电联动（将算力碳足迹纳入绿证交易）等创新模式。广东电力交易中心数据显示，2025 年上半年算力聚合商现货交易电量达 4.5 亿千瓦时，较 2023 年 1.2 亿千瓦时增长 275%，且绿电交易量达 82.9 亿千瓦时（同比增长 60.2%），环境溢价降至 6.7 厘/千瓦时。

产业协同层面，形成双向赋能的发展格局。算力支撑电力数字化转型，如百度智能云为国网提供的 AI 巡检系统使运维效率提升 3 倍；电力保障算力绿色发展，如三峡集团在长三角建设的“风光储数据中心”实现清洁能源就地消纳。中国信通院预测，到 2025 年底算电协同将带动相关产业规模突破万亿元。

电促会提出三阶段发展路径：2023-2025 年为探索期，重点突破关键技术；2026-2030 年为全面协同期，建立市场化机制；2031 年后进入深度融合期，实现“算力即电力”的智能调度。这一演进过程将

推动能源与数字两大革命实现历史性交汇。

本章通过“问题-政策-实践-愿景”的逻辑链条，完整呈现了算电协同的发展背景。技术业务需求揭示了协同必要性，国家政策提供了制度保障，行业实践验证了可行性，最终形成“规划-调度-市场-产业”四维协同的愿景框架。这为后续章节的技术架构设计和应用场景探索奠定了坚实基础。

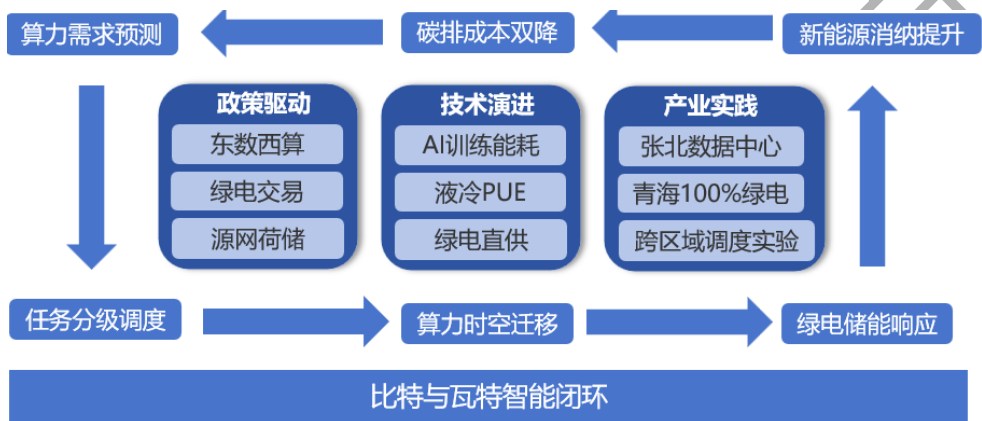


图 1-1 算力与电力协同发展驱动逻辑图

二、算电协同功能架构及关键使能技术

为推进算力电力协同创新发展，整合电力与算力资源，实现能源高效利用与算力灵活调度，进一步推动数字经济与能源领域深度融合，亟需开展算电协同体系架构与关键技术创新。本章首先介绍了算电协同功能架构，然后对算电协同潜在关键使能技术进行分析总结。

2.1 算电协同功能架构

算电协同功能架构是实现算力系统与电力系统深度融合的功能支撑体系。该架构遵循分层解耦、模块协同、智能演化的设计理念，围绕资源调度、系统感知、任务控制、能效优化等核心目标，构建涵盖从基础设施到智能决策的完整功能闭环。整体架构划分为五个功能层级：基础设施层、数据接入层、智能决策层、应用服务层与安全保障层。

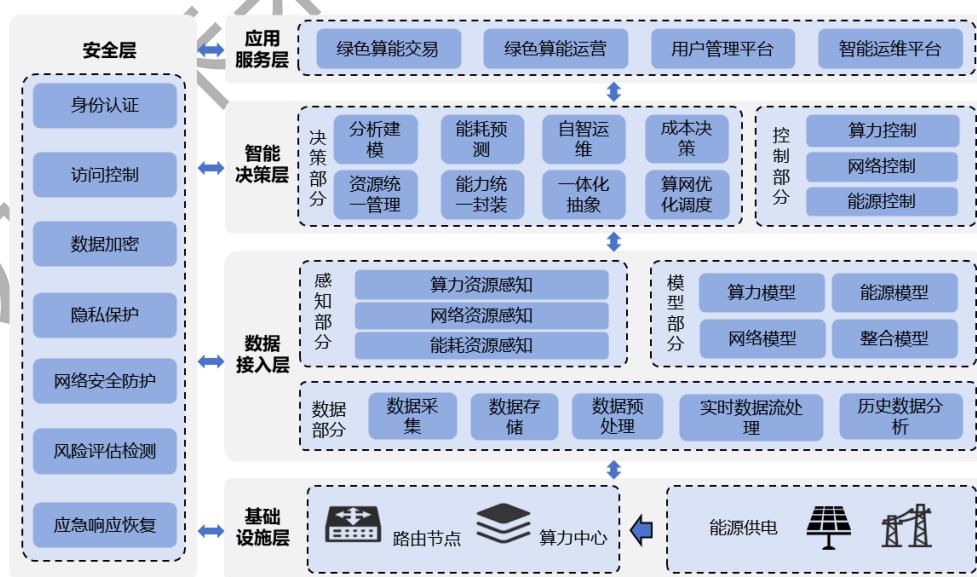


图 2-1 算电协同功能架构图

（1）基础设施层

基础设施层是算电协同系统的物理承载基础，包括计算基础设施（如边缘节点、云平台、高性能计算集群）、网络基础设施（如确定性以太网、广域传输链路）以及能源基础设施（如光伏阵列、储能设备、电力监测终端）。本层负责算电任务的运行支撑与能量供给，要求具备高可用性、可扩展性与绿色化能力。

（2）数据接入层

数据接入层在算电协同中发挥着统一资源感知与数据支撑的基础作用，具体包括感知模块、建模模块与数据服务模块。具体功能有：实现对算力、电力、网络等多源异构资源状态的实时感知与数据采集、构建任务行为与资源状态的多维建模体系，支持预测评估与能效优化以及提供边缘与中心的数据缓存、分发与分析能力，为调度控制策略提供数据支撑^[1]。该层实现算电资源的全域感知、精准建模与高效数据支撑，助力智能调度与协同优化。

（3）智能决策层

智能决策层是实现算电资源全局优化与任务智能调度的核心层级，融合了控制机制与决策智能。该层集成算力调度、电力分配、网络控制等功能模块，结合人工智能、大数据分析、强化学习等技术，开展资源预测、任务规划、碳排控制与成本评估。

（4）应用服务层

应用服务层负责对算电系统内各类服务能力进行统一注册、封装与组合。该层支持多租户接入、服务模板管理、任务部署调度与运行状态监控，确保算电服务的灵活调用与高效交付。

（5）安全保障层

安全保障层为算电系统提供全面的可信运行环境。该层涵盖身份认证、访问控制、数据加密、隐私保护、可信交易与应急响应等功能，构建纵深防御体系，确保数据安全、交易可信与服务可用。

算电协同功能架构通过五层功能模块的协同配合，实现从“资源运行”到“智能调度”的全流程闭环支撑。该架构可适应多业务场景、复杂资源环境与动态负载需求，为算电系统提供可持续、高效率、高可靠的服务支撑能力。

2.2 算电协同关键使能技术

在算电协同体系中，使能技术是实现算力、网络与能源资源高效融合与协同调度的关键支撑。其涵盖从底层资源纳管，到能源多能互补调度，再到全局感知预测、确定性网络承载、智能化决策控制、全周期数字孪生以及多要素可信交易等多个环节。通过技术协同共同构筑面向绿色、低碳与高效运行目标的算电融合基础设施底座。

表 2-1 算电协同关键使能技术表

技术名称	核心目标	关键方法
多元异构算力适配纳管	统一管理跨层级、跨架构、跨域的算力资源	资源建模与能力抽象、异构资源编排与统一调度、标准化接口与协议、“中心+边缘”纳管
多能互补电力协同调度	实现算力系统与能源系统的时空优化耦合	源网荷储一体化、多能互补、综合能源系统集成、任务负载预测与自适应调度
算电协同感知模型构建	实现算力、电力、网络多维资源的实时感知与预测	感知采集、智能融合、预测决策（LSTM、Transformer 等）
高可靠确定性网络承载	保障算电任务传输的低时延、高可靠性	时间敏感网络（TSN）、SRv6、广域无损网络（RDMA、RoCEv2）、网络测量与反馈
生成式智能化决策控制	实现资源调度的智能生成与自适应优化	生成式算法（Transformer）、在线学习与反馈机制
全周期高实时数字孪生	构建算电系统的虚实映射，实现实时监控与优化	生命周期管理、实时监控与反馈、自适应控制
多要素高可信算电交易	构建透明、公平、可追溯的资源交易机制	区块链、智能合约、碳排放因子与能耗权重、多维资源组合交易

2.2.1 多元异构算力适配纳管

在算电协同体系中，算力资源的异构性是调度管理的关键挑战。当前计算资源呈现出多层级（云、边、端）、多架构（CPU、GPU、FPGA、ASIC）以及多运营域（公网、私网、专网）并存的格局。与此同时，各类算力节点在任务响应能力、能耗水平、部署位置等方面存在显著差异，若无法统一建模与纳管，将严重制约协同效率。因此，构建面向多元异构算力资源的适配与纳管机制，是实现算电协同调度的核心基础^[2]。

面向异构算力系统的纳管体系，主要从资源建模、能力抽象、标准接口和自治控制四个维度进行构建：

（1）资源建模与能力抽象：通过构建统一的资源建模框架，对不同类型算力资源的算力指标（如 FLOPS）、能效比（如 TOPS/W）、网络延迟、功耗水平等进行标准化表达，形成可调度、可比对的虚拟算力单元（Virtual Computing Unit, VCU），为算电协同调度提供抽象载体^[3]。

（2）异构算力编排与统一调度：引入容器化调度（如 Kubernetes）与算网融合调度框架（如 Volcano、KubeEdge），实现 CPU、GPU、FPGA 等异构资源的统一调度与按需编排，满足不同计算任务对性能、时延、能耗的差异化要求。

（3）标准化接口与协议体系：面向算电平台与应用接入侧，建设支持 OpenAPI、gRPC、ONNX Runtime 等协议的标准化接口体系，确保多厂商、多系统环境下的资源能力可识别、可调用、可复用。

（4）自治控制与边缘纳管：构建“中心+边缘”双层纳管体系，在边缘节点部署智能代理模块，实现算力资源的状态感知、自主注册、动态调控与异常恢复，降低系统整体运维复杂度，增强纳管系统的可扩展性与鲁棒性。

多元异构资源适配纳管体系的建立，不仅提升了资源统一管理的效率，也为实现弹性算力提供了必要前提，构筑算电协同系统的算力基础设施底座。

2.2.2 多能互补电力协同调度

算电协同的本质，是算力系统对电力系统的深度感知、动态响应与反向驱动。在以可再生能源为主体的新型电力系统中，“源网荷储”一体化与“多能互补”协同机制成为能源高质量供应的关键支撑。实现算力系统与电力系统在时空维度上的优化耦合，是推动绿色、稳定、经济算电调度的必要路径。

在“源”侧，融合风能、光能、水能等可再生能源，构建清洁化供能体系；在“网”侧，构建覆盖广域的智能输电网络，通过输配一体的能流调控系统，实现电能的跨区协调与精准传输；在“荷”侧，引入算力负载预测^[4]与自适应调度策略^[5]，实现任务电耗负载的动态转移与均衡调控；在“储”侧，部署灵活储能单元，支撑高波动负载下的稳定供能。

此外，综合能源系统（Integrated Energy System, IES）进一步整合电、热、冷、气等多种能源形式，打通算电任务生命周期中可能涉及

的跨域能流路径，为算力基础设施提供柔性、高效、低碳的能源支撑。通过能源管理平台，算力负载可与能源供给实时互动，实现动态价格驱动下的任务迁移与能耗分摊。

该技术体系的最终目标，是构建“算为电服务、电为算赋能”的双向协同模型，推动算力基础设施与电力系统的同步演化，为构建绿色可持续的算电协同系统提供坚实支撑。

2.2.3 算电协同感知模型构建

算电感知模型是实现算电协同系统智能调度的前提保障，其目标是实现对算力状态、电力供应、网络连接质量等多维资源信息的实时感知与动态预测，从而支撑任务在调度前的精准匹配与在运行中的自适应调整。感知模型主要分为三层架构：感知采集层、智能融合层与预测决策层。

（1）感知采集层：部署于算网能三类资源的关键节点，通过传感器、控制器与标准化接口采集当前运行状态信息。例如，算力侧监测节点 CPU 利用率、内存占用、电耗水平等；电力侧感知电压波动、负载响应、电价趋势等；网络侧感知带宽、时延、丢包等关键指标。

（2）智能融合层：基于边缘计算节点与中心调度平台，对感知数据进行时空对齐、语义关联与清洗降噪，构建统一的数据表示模型。

（3）预测决策层：是感知模型的智能核心，基于大数据驱动的机器学习模型（如 LSTM、Transformer、LightGBM 等）进行任务行为建模、能耗演化建模与网络 QoS 趋势预测，进而实现如任务执行

时间预测、电力价格时序预测、节点拥堵概率评估等关键指标的前向推演。通过引入元学习、自适应学习等技术，可不断提升预测模型的泛化能力与鲁棒性。

感知模型不仅提升了调度系统的智能化水平，还为绿色调度、碳排放优化、能耗闭环控制等功能提供了决策基础，是支撑算电协同的关键使能环节。

2.2.4 高可靠确定性网络承载

在算电协同体系中，网络不仅作为资源传输的基础设施，更是连接算力、电力和调度控制各要素的关键纽带。算电任务对时延敏感性高、负载波动性大、控制反馈频繁，传统“尽力而为”的网络已难以满足协同调度所需的高可靠、低时延与高带宽性能。因此，构建支持确定性通信与资源感知调度的高可靠网络能力体系，成为算电融合发展的核心支撑。

(1) **确定性网络**基于时间敏感网络（Time-Sensitive Networking, TSN）与 IPv6 分段路由（Segment Routing over IPv6, SRv6）等技术，能够在多跳传输环境中实现端到端的低时延、低抖动与高可预测性。其核心机制包括时间同步、时隙调度、路径预留与流量整形等，适用于算电系统中对控制闭环要求高的场景（如电网调频、负载迁移、边缘推理任务传输等）。通过 TSN 调度机制，任务数据包可根据优先级与时限进行排队与转发，避免突发拥塞带来的性能波动。

(2) **广域无损网络**（Lossless WAN）通过 RDMA（远程直接内

存访问)、RoCEv2、PFC(优先级流控)等协议构建跨区域、无拥塞的数据传输路径在广域调度环境下,算电系统跨域部署广泛,涉及多级边缘、云中心与分布式电源系统,需借助广域无损网络(Lossless Wide-Area Network)技术,保障高并发数据流的传输效率与一致性。无损网络引入拥塞控制(如ECN标记)、队列优化(如RoCEv2)与端到端流控机制,在面对算力状态回传、能耗预测数据上传、电价曲线下发等数据流场景中,有效降低重传率与延迟波动,提升系统响应速度。

此外,网络还具备资源感知与调度反馈能力。通过网络测量(Network Telemetry)技术,系统可实时采集链路利用率、时延变化、带宽瓶颈等信息,反馈给算网调度平台,辅助实现路径重选、任务转移与资源重配,提升整体算电调度的适应性与鲁棒性。

通过引入确定性与无损通信机制,构建面向算电任务的高可靠网络基础,可为算电融合提供坚实的连接底座与动态支撑能力。

2.2.5 生成式智能化决策控制

算电协同网络智能决策是实现高效资源管理和优化服务的关键环节。它实时监控分析海量数据,并据此动态调整资源分配,以满足变化的用户需求和业务要求。

(1) 决策生成技术: 综合分析用户意图、业务场景、资源状态等多维信息,运用智能算法自动生成最优的资源配置和调度决策。

(2) 自适应与反馈机制: 系统通过在线学习持续更新模型参数,

适应环境和需求变化。同时收集用户反馈和性能数据，不断优化决策模型，提升准确性和鲁棒性。

综合运用这些技术，智能决策系统能高效管理资源、优化服务，提升用户体验和系统性能，增强响应速度、准确性、鲁棒性和灵活性，为算力网络智能化奠定基础。

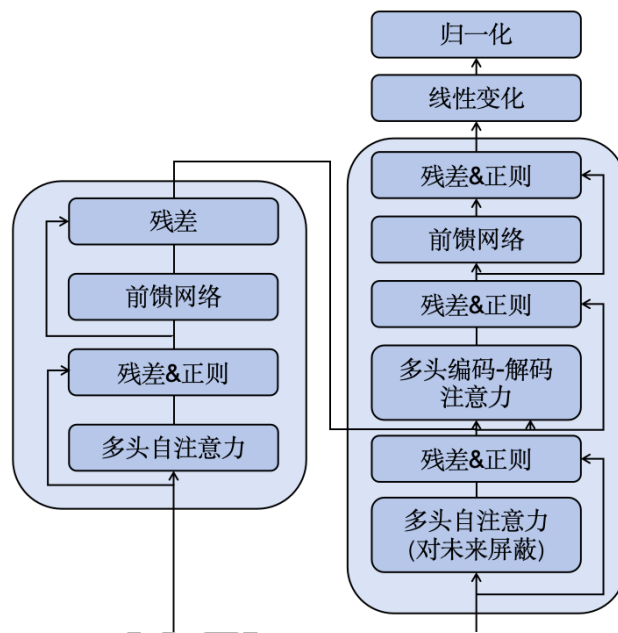


图 2-2 Transformer 原理

在智能决策中，生成式智能算法（如 Transformer）在算力能源管理等领域作用显著。Transformer 是一种先进的序列建模方法（原理见图 2-2），核心组件为编码器和解码器：

- **编码器：**输入序列经词嵌入转换为向量，再经多层编码器处理。每层包含自注意力结构（计算元素间相关性，捕捉全局上下文）和多头注意力机制（并行多角度建模，增强表达能力），以及进行非线性变换的前馈网络。

- **解码器：**除自注意力、多头注意力和前馈网络外，增加了编码

器-解码器注意力子层（建模输入与输出序列间相关性）。多层解码器堆叠，逐步生成目标序列并参考源语言上下文。

- **处理步骤：**输入编码（词嵌入）→ 编码器层（生成编码矩阵）
→ 解码器层（输出目标序列）。

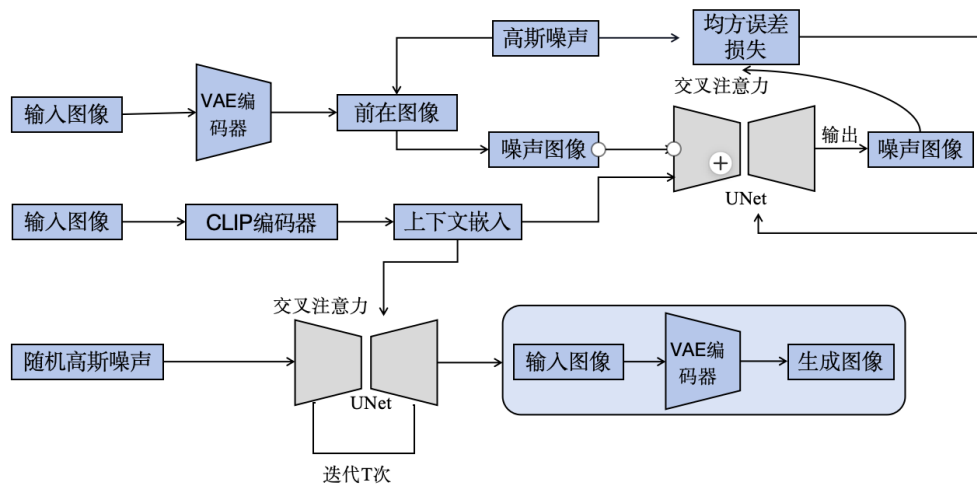


图 2-3. Stable Diffusion 原理

Stable Diffusion 是一种先进的图像生成技术（原理见图 2-3），通过多步骤从噪声生成高质量图像，涉及编码器、解码器、学习的条件、采样和去噪阶段：

- **编码阶段：**预处理后，图像经编码器网络转换为潜在图像（捕捉关键特征）。
- **学习条件：**提取编码器特征或其他条件信息（如使用 CLIP 编码器——基于对比学习对齐图文语义的模型）指导生成。
- **采样阶段：**对潜在图像采样，生成向量输入生成器。
- **去噪阶段：**迭代使用生成器网络和学习条件，从噪声逐步恢复高质量图像。

其核心技术包括：

- **VAE (变分自编码器)**: 由编码器 (压缩图像, 保留深层特征) 和解码器 (恢复至像素空间) 组成。
- **条件编码器 (如 CLIP)**: 提供图文语义指导。
- **UNet**: 经典的编码器-解码器结构图像分割模型。编码器 (卷积和池化层) 逐步提取特征并降维; 解码器 (上采样和特征融合) 逐步恢复尺寸并生成结果。在此用于实现高质量图像生成, 有效融合多级特征处理不同目标, 具有强鲁棒性。

2.2.6 全周期高实时数字孪生

在算电协同的控制阶段, 数字孪生技术的应用至关重要, 能有效提升网络管理效率、优化资源调度。其应用主要体现在孪生体的生命周期管理、实时监控与反馈、自适应控制策略等方面。

(1) 生命周期管理涵盖从创建、运行、优化到维护的全过程。

- **创建阶段**, 系统需从物理算力网络中获取基础数据, 包括计算节点拓扑结构、资源利用率、数据流向等, 并利用数据建模技术构建虚拟映射体, 此过程依赖传感器数据采集、网络日志分析以及人工智能算法, 以确保孪生体对物理系统的映射精度足够高。

- **运行阶段**, 孪生体实时同步物理网络的状态数据, 并通过多层次建模手段, 实现对算力资源的动态监测和智能预测, 结合大数据分析和机器学习, 不断优化预测能力, 提高资源调度的准确性, 确保算力网络的高效运作。

- **优化阶段**, 系统基于长期运行数据和动态环境变化, 对孪生体

进行智能调整，适应不断演进的计算需求，优化过程主要依赖数据挖掘、强化学习以及自适应优化算法，涉及能耗管理、资源负载均衡以及异常检测等多个方面。当孪生体的运行性能下降或算力网络发生重大变更时，需进入维护或替换阶段，系统对孪生体的建模精度进行评估，并依据最新的物理网络状态对孪生体进行升级或重构。

（2）实时监控与反馈机制使得算力网络能够在毫秒级时间内感知网络状态，并据此调整资源分配策略。在实时监控体系中，孪生体从物理网络中获取计算节点的运行状态数据，并结合历史数据进行趋势分析，以预测未来算力需求，这一过程依托于云计算、边缘计算以及大数据分析技术，使得孪生体能够在计算资源紧张或任务负载激增时，迅速调整调度方案，优化算力资源的利用率，同时提供可视化数据展示，使管理者能够直观了解算力网络的运行状况。

（3）自适应控制策略的核心目标是根据算力需求的实时变化，动态调整计算资源分配方案。传统算力网络的控制机制基于固定规则设定，在面对突发计算需求或网络环境变化时存在明显局限性，而数字孪生的自适应控制策略依赖于强化学习、神经网络和深度学习等人工智能算法，能够在不断变化的环境中进行实时调整。自适应控制策略还能实现智能负载均衡与能耗优化，实时监测网络状态，根据当前计算需求，动态调整计算资源的分配，当计算需求低谷时，关闭部分计算节点，以减少能耗，而在计算需求高峰时，自动扩展计算资源，确保计算任务能够高效执行，同时利用历史数据预测未来计算需求，提前做好资源调度准备，减少突发计算需求对系统稳定性的影响。

2.2.7 多要素高可信算电交易

算电协同系统作为多主体参与、多资源流动、多场景协同的新型体系，其资源调度与服务模式日益朝着市场化、自组织方向发展。在此背景下，传统依赖中心化平台的资源交易模式难以满足系统对透明性、公平性与可追溯性的需求。因此，构建基于区块链的算电资源可信交易机制，是推动算电协同迈向开放协同与高可信自治的重要路径。

交易机制将算力供应商、电力供应商、任务需求方、调度平台等多方纳入统一的可信网络中，通过分布式账本技术实现资源状态、价格、交易等信息的同步共享与共识记录。系统引入智能合约机制，支持自动化的资源撮合、价格结算、服务审计等交易过程，降低交易成本与信任门槛。例如，当用户提交调度请求，平台可通过合约自动比对资源匹配度与碳排等级，在多方中择优生成交易对并完成资源绑定。

可信交易机制支持多维资源的组合交易，如“算力+绿电”、“计算+带宽+时延保障”资源服务。平台可在交易中引入碳排放因子与能耗权重，实现绿色优先调度与碳资产管理。同时，系统支持引入可验证计算、可信执行环境等技术，确保服务方履约情况的链上可验证与纠纷可追溯，提升资源交易体系的可靠性与安全性。

此外，平台还可与现有电力碳市场、算力服务平台进行对接，推动“算电碳”三要素在价值层面的融合交易。例如，完成某一绿色算力任务后，平台可根据实际能耗计算并发行碳积分，作为绿色任务的凭证，支持后续在能源积分交易市场中自由流通。

区块链技术为算电资源交易构建了“可信账本+自动履约+多方协

作”的数字信任基础。未来，基于可信交易机制的算电协同系统将具备更高的市场弹性、更强的资源流通效率以及更优的绿色发展能力，成为数字经济与绿色能源深度融合的重要支点。

第九届未来网络发展大会白皮书

三、算电协同典型应用场景

在“双碳”目标引领下，算力基础设施与电力系统的深度融合已成为推动能源转型与数字经济发展的关键路径。一方面，以“算随电调”为代表的调度机制，通过柔性调控算力负荷主动适配新能源出力特性，有效提升可再生能源消纳能力；另一方面，“电随算用”模式通过电力资源的动态优化配置，满足算力负荷的差异化需求，实现绿电高效利用与算力稳定运行的协同。两种模式互为补充，共同构建了“源-网-荷-储-算”一体化发展的新格局。

算电协同典型应用场景	
电随算用	算随电调
西北风光基地与“绿电算力集群”的协同	跨区域云计算算力调度
分布式新能源匹配边缘计算节点	弹性算力任务与新能源的峰谷适配
长短期储能节点与算力节点协同	“源网荷储”的一体化算力调度

图 3-1 典型算电协同应用场景

3.1 算随电调，助力电力新能源消纳

在“双碳”目标驱动下，算力基础设施作为新型能源负荷的重要组成部分，正在成为影响电力系统运行的新变量。随着大模型训练、人工智能推理、批量渲染等高能耗算力任务需求激增，算力能耗占比持续上升，对电网负荷和新能源消纳能力提出更高要求。在此背景下，“算驱电”调度机制应运而生，即通过算力任务的柔性调控，主动响应电力系统状态，提升可再生能源利用水平，实现算力与电力系统的深度

融合协同。

表 3-1 算随电调应用实例表

序号	项目	位置
1	Tesla 自动驾驶训练集群调度	美国内华达州
2	Microsoft Azure 爱尔兰风电数据中心	爱尔兰都柏林
3	字节跳动 "清洁能源算力迁移"项目	内蒙古乌兰察布
4	阿里云"算力-电力"联动项目	浙江杭州

(1) 发展特点

当前，我国可再生能源发展呈现出集中式大规模接入与分布式多点消纳并存的格局，风电、光伏等清洁能源资源具有明显的波动性和间歇性，部分地区“弃风弃光”问题仍较突出。与此同时，算力资源呈现“可转移、可延迟、可拆分”的典型特征，为其作为“柔性可控负荷”参与电力系统调度提供了现实基础，具备广阔的技术应用前景。

然而，算力参与电力系统调度仍面临多重挑战：一是算力任务调度与电网调控节律之间存在时空偏差。由于算力任务的调度粒度与电网调控节律存在时空偏差，因此亟需建立更精细化的预测与匹配机制。二是算力调度策略无法完全适配电力系统的调度特点。当前算力调度主要以算力利用效率为核心，与能源调度的目标不一致，缺乏面向电力系统友好性的联合优化策略。三是能源系统与算网系统之间的建模标准存在壁垒。由于能源系统与算力系统之间仍存在数据壁垒与接口不兼容问题，联合优化过程中容易产生模型冲突，因此制约跨系统协同能力的提升。

（2）应用现状

在实际应用中，西北风光基地与“绿电算力集群”的协同调度便是“算随电调”的典型场景。我国西北地区（如甘肃、宁夏）拥有多个千万千瓦级风光基地，是新能源富集区域，但同时也面临着新能源消纳难与算力需求增长的双重挑战。一方面，风电、光伏受天气影响显著，出力随机性强，若本地用电负荷不足，易出现“弃风弃光”现象，2022 年西北弃风率约 3%，弃光率约 2%，仍有较大优化空间；另一方面，数字经济的蓬勃发展推动 AI 训练、数据备份、视频渲染等算力任务激增，而算力中心属于高耗能设施，单座超算中心年耗电量可达 10 亿度以上，若依赖火电则与“双碳”目标相悖。基于此，当地在“风光”基地周边布局“绿电算力集群”，借助“算随电调”模式实现新能源与算力的协同，既解决了新能源消纳问题，又为算力提供了低成本的绿电。

该场景的具体运作流程在不同时段呈现出不同特点。在白天光伏大发时段（9:00~15:00），光伏出力峰值较高，风电出力较低，总新能源出力存在过剩情况。此时，算力调度系统启动“负荷提升模式”，优先运行延迟容忍类任务，使算力集群满负荷运行，恰好消化过剩的新能源电力，避免弃光。傍晚风光交替时段（17:00~19:00），光伏出力快速下降，风电出力有所上升，但总新能源出力无法完全覆盖本地负荷，存在缺口。算力调度系统切换为“负荷削减模式”，仅保留实时性任务，降低算力负荷，以匹配新能源出力与本地负荷的总和。夜间风电波动时段（23:00~次日 3:00），光伏停运，风电出力波动大，

可能导致电力供需失衡。算力调度系统启动“动态跟随模式”，根据风电出力的变化实时调整算力负荷，以实现电力的平衡。

“算随电调”模式的有效运作离不开关键支撑技术。新能源出力预测系统基于 AI 模型，结合气象数据提前预测风光出力，为算力调度提供时间窗口；算力任务分级机制将任务分为实时性、延迟容忍和弹性三类，便于根据电力情况进行调度；电算协同调度平台整合各类数据，通过优化算法实时输出调度指令，实现电力与算力的协同。

该应用场景取得了显著的效果，新能源消纳率大幅提升，风光弃电率从原 3%~5% 降至 1% 以下，年增新能源利用量超 1 亿度；算力成本降低 20%~30%，得益于新能源低谷电价；同时，低碳效益显著，50 万千瓦算力集群年减碳量约 40 万吨（等效替代火电）。

（3）未来需求及发展趋势

面向未来，应构建“源-网-荷-储-算”一体化协调控制架构，通过融合可再生能源功率预测与算力负载预测，建立基于绿电友好性的算力调度模型，动态匹配任务类型与可用清洁电力资源。在此基础上，结合碳价、电价、负荷调节能力等多源信号，引导算力任务向新能源出力高峰区域与时段迁移，通过算力任务的集中调度提升可再生能源的消纳水平，同时推动算力基础设施向绿色、低碳、高效方向演进，助力构建新型电力系统与智能算力网络深度融合的发展新格局。

3.2 电随算用，满足算力新负荷需求

在新型电力系统构建和“东数西算”工程加快推进的背景下，我

国算力基础设施正逐步向风光资源富集、绿电占比高的区域集聚。为提升可再生能源本地消纳能力，实现绿色能源与数字算力的融合应用，“电驱算”调度机制应运而生。该机制通过可再生能源侧的主动感知捕捉可再生能源的出力波动，引导可延迟算力任务的调度决策与适时启动，有效促进新能源出力与算力负荷的动态耦合，成为推动源-荷协同、促进绿电增值的重要路径。

表 3-2 电随算调应用实例表

序号	项目	位置
1	美国德州“ERCO”弹性算力电网	美国得克萨斯州
2	冰岛“地热-算力协同系统”	冰岛雷克雅内斯半岛
3	深圳“5G 基站+虚拟电厂”项目	广东深圳
4	青海“绿电+算力”一体化示范区	青海海南自治州

（1）发展特点

当前“电驱算”应用仍面临协同能力不足的问题。其主要问题有以下三个方面：一方面，新能源出力与算力任务间歇的维度不一致。新能源出力的间歇性与算力业务运行的连续性存在时序不匹配问题，需依赖高精度的负荷与资源预测模型；另一方面，算力任务迁移约束复杂。算力任务的跨域迁移涉及算力调度、链路传输与业务可靠性等多重约束，系统响应能力和成本控制能力要求较高；最后，电力系统与算力系统的协同缺乏一致性协议。电力系统与算力系统间缺乏统一的资源编排接口与调度协议，统一调度还存在困难，制约协同机制的高效落地。

（2）应用现状

在东部 AI 算力枢纽与“灵活电力池”的动态适配场景中，东部沿海地区作为数字经济核心区，算力需求巨大，但面临算力负荷波动剧烈、电力保供压力大及绿电替代需求迫切等挑战。为此，当地构建“灵活电力池”，整合多元电力资源，围绕算力负荷变化进行动态调度。在常规算力时段，以稳定负荷为主，电力池优先启用基荷电源并辅以调节电源，维持供电稳定；算力高峰时段，启动全量电源协同并启用需求响应备用，保障电力供应不缺口、不波动；算力低谷时段，削减可调电源出力，启用低成本绿电，同时让储能系统充电，降低用电成本。

这一模式的有效运作依托于关键支撑技术体系：首先，算力负荷预测系统基于人工智能算法与大数据分析，可对算力集群的运行状态、任务调度及能源消耗进行分钟级动态预测，误差率控制在 3%以内；其次，协同调度技术通过建立电力算力资源双维度模型，实现风光储等新能源、电网侧可调节负荷与数据中心算力需求的智能匹配，提升资源利用效率超 20%；此外应用该模式通过动态算力调度与电力供应的精准匹配，将算力系统的平均故障间隔时间提升 40%，关键业务连续性保障能力显著增强；依托智能负荷预测算法，电力资源利用率从 68%提升至 85%，有效降低电网峰谷差；在绿电消纳方面，实现年度绿电占比达 75%，超额完成区域碳减排目标，经测算每年可减少二氧化碳排放超 12 万吨；同时，通过错峰用电策略与电力市场交易优化，企业综合用电成本同比下降 18%，实现经济效益与环境效益的双重

突破。

（3）未来需求及发展趋势

未来，构建面向“电驱算”场景的一体化感知与协同调度平台，是实现可再生能源柔性负荷引导的关键路径。该平台应集成新能源出力预测、算力任务特性度量、迁移成本评估等核心能力，通过发布“算力调度时间窗口”，驱动 AI 训练、数据分析等可调任务向绿电富集时段和区域主动靠拢。同时，结合实时电价、碳排放强度和系统负荷水平，实现多维调度信号融合控制，推动绿电高效利用与算力系统绿色运行的深度耦合。

四、算电协同生态建设

在“双碳”战略、数字中国与新型电力系统共同推动的背景下，算力基础设施作为新型生产力的关键支撑，其运行能耗与电力系统间的互动关系日益紧密。构建算电协同生态，已成为推动产业绿色升级和技术创新融合发展的重要抓手。“十五五”期间，我国需统筹考虑算力侧与电力侧协同规划、智能响应与绿色低碳路径，实现从单点优化向系统性协同升级，形成全产业链高质量发展新格局。

4.1 电力侧发展与绿色转型

4.1.1 优化可再生能源供给体系

随着人工智能、大数据、云计算等新兴技术的快速发展，算力基础设施呈现出高密度部署、高能耗运行的特征，电力消耗量逐年攀升，绿色低碳的能源供给能力正成为算力可持续发展的基础保障^[6]。构建以可再生能源为主体的电力供给体系，不仅是响应国家“双碳”战略的重要举措，更是推动算力产业绿色转型、实现经济社会高质量发展的必然要求。

一方面，应加快构建以风电、光伏、水电、生物质能等为核心的多元化清洁能源生产体系，推动可再生能源从集中式开发向分布式融合转变。在资源禀赋优越的西部地区和风光富集的边缘区域，应加快推进大型风光基地建设，配套建设高可靠性输电通道，为全国算力节点提供稳定可控的绿色电力。同时，在东部用电负荷密集地区，可因地制宜发展分布式光伏、建筑光伏一体化等新型供电方式，实现“就

地发电、就近使用”，有效缓解电力调配压力。

另一方面，应以“源-网-荷-储”协同发展为主线，构建柔性、高效、智能的新型电力系统。具体而言，在“源”端推动风光等新能源灵活接入和输出平滑化，在“网”端加快构建坚强智能电网与跨区互联通道，在“荷”端优化算力负荷调度方式、提升响应能力，在“储”端加快部署新型储能设施如锂电池、液流电池、氢储能等，实现多时空尺度下的电力调节与冗余释放，增强算力与电力之间的耦合度和协同度。



图 4-1 能源供给示意图

此外，应重点支持在清洁能源资源富集区建设“零碳园区”或“可再生能源直供型”算力集群。例如在青海、内蒙古、新疆等地，依托光伏、风电优势，打造清洁能源供电的智算中心或超算基地，实现算力资源“就近绿色供给”，减少长距离输电损耗，提高能源利用效率^[7]。在这类示范园区中，可探索能源互联网、园区级微电网、源荷储一体化系统的深度融合，为全国算力与能源协同发展提供先行先试样板。

同时，还应注重绿色电力的市场机制创新。通过推动绿电交易、电力现货交易与算力调度的联动机制，建立算力负载与绿色电力之间

的实时动态映射关系，使算力设施能够依据绿电价格变化灵活调整任务排布与能耗策略，实现资源与环境效益的最优协同。绿色电力消费凭证（GEC）和碳配额制度也应逐步引入算力行业，使算力企业通过市场化手段实现低碳运营、环境友好型发展的目标。

4.1.2 完善供需动态平衡机制

供需平衡的可持续运行需市场化调节机制支持，应完善电力现货市场和辅助服务市场，建立与算力用电行为挂钩的价格信号传导机制，引导算力基础设施依据电力系统运行状态灵活调整运行策略。政策引导方面，可通过绿色电价、差异化电费、碳积分奖励等方式，推动算力设施在非高峰时段运行或优先使用清洁能源，提高系统调节响应积极性。感知与控制系统能力提升也是关键，构建面向电力与算力融合的统一调控平台，实现电力供需态势、算力资源分布及响应措施的全局感知与统一调度。在关键节点部署智能计量和快速控制装置，实现微秒级数据采集与指令响应，提升调度响应精度和系统协同效率。推动相关标准与制度制定完善，明确算力设施参与电力系统调节的技术规范、数据格式和接口协议，建立统一规则体系。构建多方协同工作机制，推动传统供给中心平衡体系向负荷柔性、供需协同的动态调节机制转型，促进绿色、稳定、高效的能源-算力融合生态建设。

4.1.3 提升算力产业支撑能力

对算力产业的支撑能力方面，算力作为新质生产力的重要体现，能源作为其运行的基础资源，其供给质量、调配效率和绿色属性直接

影响产业整体发展质量。实现算力基础设施的集约化、高可靠和低碳运行，需系统构建适应算力产业需求的多维能源支撑能力。首先，提升能源供给的可靠性和适配性是保障算力系统稳定运行的前提。智算中心和超算节点对电力供给有高连续性和冗余性要求，应围绕重点区域建设高可靠、高负载电网接入体系，优化供电路径结构，增强电源冗余配置能力。配置区域级或站级储能系统，构建“主电源+储能+备电”三重保障模式，提高抗扰能力。为提升能源使用效率，引导算力产业开展能源精细化管理，通过建设能耗管理系统和能效监测终端，实现对机房负载、电源系统、冷却系统全流程能耗的数据采集和智能分析，推动 PUE 等核心指标持续优化^[9]。探索负荷聚合与边缘调度机制，将边缘节点零散计算任务统一纳管，提升算力与电力资源协同调度能力，降低能耗冗余。构建绿色能源导向的能源接入体系，是算力行业低碳转型关键。应在风光资源富集区和沙漠荒漠等绿电潜力区域布局清洁能源直供算力集群示范项目，实现电源侧绿色化、负荷侧集约化和网络侧高效化协同。结合绿电消纳政策与市场机制，引导算力企业通过集中式绿电采购和可再生能源证书交易提高绿电使用比例。建立分类分级能源服务体系，针对不同算力场景（如超算中心、大规模云计算、边缘计算节点）设计差异化的供电保障方案，兼顾稳定性、经济性与绿色属性。最后，加强能源与算力产业技术标准和运维体系对接，推动绿色运维技术、智能监测预警与快速响应体系建设，提升系统整体运维效率和安全水平。通过构建高可靠、低碳、高效、智能的能源支撑体系，为算力基础设施提供坚实保障，助力构建绿色低碳

的数字经济发展新生态。

4.2 算力侧规划与能源协同

4.2.1 规划与布局算力基础设施

算力侧发展规划同样需紧密结合能源禀赋、通信网络布局及政策导向，推动算力资源与清洁能源基地协同布局，实现算力资源的合理分布和绿色高效运行。超算中心与智算中心需实现由东向西梯度转移，优化网络传输路径，提升算力资源全国平衡与调度效率。数据中心建设标准应强化绿色低碳指标，推动 PUE、WUE 等达到国际先进水平，积极推广液冷等节能技术^[10]。边缘计算节点需结合分布式电源、储能和微电网建设，提升能源供给的灵活性和系统的鲁棒性。异构计算架构融合与资源池化平台建设，满足多样化业务对算力的动态分配需求。构建“中心-边缘-终端”三层协同体系，支持多样算力应用。加强标准化体系建设，推动算力资源接入与能效评估标准统一，提升算力绿色发展水平。

此外，还需加强标准体系建设与技术体系对接，推动资源接入、能效评估、调度接口等关键环节的标准化、模块化，提升算力设施建设的通用性与兼容性。在政策层面，加快出台异构算力资源配置与绿色能耗评估导则，推动算力设施向高性能、可扩展、绿色低碳方向加速演进。

通过上述多层次、系统化的基础设施规划与建设布局，将有力夯实算力产业发展的底座，支撑智能经济的快速发展，推动我国算力体

系实现结构优化、效能提升与绿色转型的战略目标。

4.2.2 构建算力-电力接口技术

随着大规模算力基础设施的不断学习，算力系统对电力系统的依赖愈加紧密。算力设施已不再是传统意义上的被动用能方，而逐步演变为具备柔性调节能力的负荷资源，在新型电力系统建设中具备积极作用。构建高效、标准化的电-算接口体系，是实现算力基础设施绿色运行与电网协同调节能力提升的关键环节。

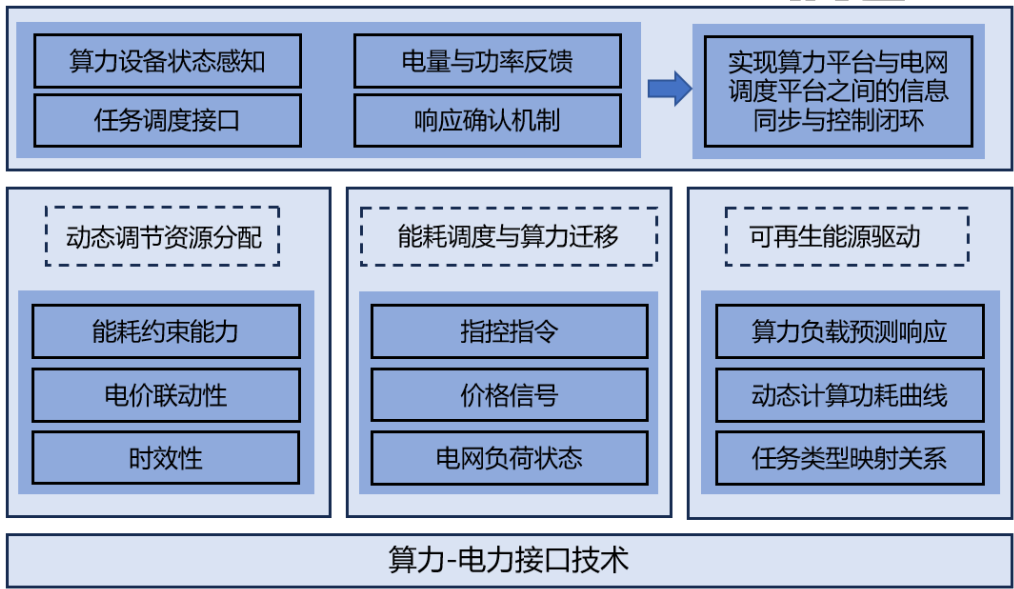


图 4-2 算力-电力接口技术示意图

当前，算力负载具备高度可编程性与运行时可控性，在任务调度、资源分配等环节具备较强的弹性，能够根据外部能耗信号动态调整运行状态。结合智能调度系统，可在不影响关键计算任务执行质量的前提下，释放出一定比例的调节能力，对应电网的负荷波动进行响应。通过构建具备时效性、电价联动性和能耗约束能力的运行策略，推动算力资源主动参与电力系统的频率控制、负荷平衡和需求响应，提升

整体系统运行的稳定性与柔性。

面向新型电力系统发展趋势，需要推动算力设施深度接入电力市场体系，在技术上打通两类系统间的接口屏障。为此，应建立覆盖监控、通信、调度等多维度的技术对接标准，确保算力平台能够实时接收电网负荷状态、价格信号和调控指令，并据此进行能耗调度与算力迁移。算力任务的批处理属性、低时效性容忍度等特点，使其具备成为可中断负荷的潜力，在负荷侧资源日益多样化的背景下，提供了一类全新的调节资源形态^[11]。

此外，在能源互联网和多能融合背景下，还需构建统一的算力负荷模型与运行行为描述机制，使电力系统能够识别并预判算力运行对供能系统的影响。例如，通过建立动态计算功耗曲线与任务类型映射关系，可实现算力负载在不同工况下对电网功率变化的预测响应，从而纳入系统级调控模型中。

标准体系建设是推动算力设施参与电力市场交易和辅助服务的前提。应制定涵盖算力设备状态感知、任务调度接口、电量与功率反馈、响应确认机制等内容的互联协议，实现算力平台与电网调度平台之间的信息同步与控制闭环。配套数据安全与隐私保护机制，确保算力运行数据在调度过程中的可控、可审与合规使用。

面向未来，应鼓励各类智算平台、边缘节点及数据中心运营方参与需求响应机制试点，在新能源占比高、电网调节能力薄弱的区域开展算力调节能力评估与验证。通过构建多类型算力节点响应特性数据库，建立典型场景下的调度机制，为形成统一的技术标准体系和市场

交易机制提供基础支撑。

通过推动算力系统从单一耗能载体向可调节负荷资源转变，构建完善的电—算接口技术体系，将为新型电力系统注入新的柔性资源，有效提升能源使用效率，推动算网融合系统向低碳、智能、高效方向持续演进。

4.3 平台侧建设与功能优化

为实现绿色低碳发展目标，推动新型基础设施高质量建设，构建算电协同平台成为实现算力网络与电力系统高效融合的重要路径。当前，随着数据中心规模持续扩大和计算需求快速增长，算力设施的能耗问题日益突出，迫切需要构建以“网络运营商、算力服务商、电力能源企业”三方为核心的算电协同体系，实现资源高效调度与能耗动态控制。在此背景下，算电协同平台建设应围绕资源集约化、能耗优化和调度智能化三大核心目标展开，打通算力供需与电力供需之间的壁垒，推动算网与电网的深度融合。

平台总体架构可划分为协同控制层、资源接入层以及数据与服务层。其中，协同控制层负责调度逻辑的统一与策略制定，涵盖算力资源与电力资源的协调控制机制。资源接入层实现不同来源的算力节点（如边缘、云端、终端）与电力资源（如传统电网、可再生能源、储能装置）的统一接入与管理。数据与服务层则汇聚平台运行状态、用电负载、算力任务以及碳排放数据，通过智能分析技术，支撑上层优化控制和动态决策。

下表简要列出了平台架构的三层功能：

表 4-1 平台架构功能表

层级	功能描述
协同控制层	统一调度策略制定，实时协调算力调度与能耗调配，实现最优资源匹配
资源接入层	对接多类异构算力和电力资源，保障平台资源可扩展性与可调控性
数据与服务层	提供任务预测、电力动态分析、碳排监测等数据支撑，赋能智能化平台运行

平台核心功能模块主要包括四个方面：一是算电资源映射模块，通过构建算力任务特征与用电曲线之间的对应关系，实现资源配置的精准化；二是多方协同调度模块，支撑网络运营商、算力服务商、电力能源企业的信息互通与策略联动，提升整体系统响应能力；三是碳排放监测与控制模块，借助传感与数据采集技术，实时掌握不同计算任务或节点的碳排放数据，并提供优化建议；四是基于市场机制的激励模块，引导用户或算力服务商在电力紧张时主动调整任务策略，或利用绿电资源以获取经济激励，从而推动绿色调度目标实现。

算电协同平台在多个典型场景下展现出显著效益。例如在高能耗任务分流方面，平台可将非关键任务自动迁移至低碳或低电价区域执行，从而缓解本地电网压力并降低碳排放；在用能负荷响应场景中，平台结合电价波动或供需变化，动态调整算力任务执行顺序与节点分布，实现算电双赢；而在能源与计算资源联合规划场景下，平台还可依据区域算力布局与电力结构，形成城市级或园区级的绿色算力部署策略，提高资源利用率的同时支持区域能源系统平衡。具体场景与预期收益如下表所示：

表 4-2 场景与预期收益说明表

应用场景	场景说明	预期效益
高能耗任务分流	将可延迟任务迁移至绿电丰富或电价低区域执行	降低碳排放与电网运行压力
用能负荷响应	根据电价或负荷预测动态调度算力资源	降低能耗成本，实现负荷平衡
联合资源规划	融合算力需求与区域电力结构制定部署策略	提高能效比，助力区域碳达峰

相关研究表明，算电协同平台能够显著提升资源利用效率，实现系统整体能耗降低 10%~20%^[8]，同时增强算力系统的可持续运行能力。通过动态任务调度与电力响应机制的结合，平台实现了技术驱动下的碳减排目标，具备良好的可推广性。

未来算电协同平台的持续发展应聚焦于三方面：首先，在标准制定方面，需构建统一的数据模型与资源接入接口，打通不同参与主体之间的技术壁垒；其次，在示范试点方面，应推动园区级、城市级的协同平台部署，验证关键技术与机制的可行性；第三，在激励机制设计方面，建议深化碳成本内部化手段，探索算电交易市场与碳交易机制的融合路径，以市场力量推动绿色算力交易行为的常态化与制度化。通过政策引导与技术创新双轮驱动，算电协同平台将在推动绿色低碳数字经济发展中发挥重要支撑作用。

4.4 用户侧协同与服务创新

4.4.1 推进需求侧响应模式

(1) 算力弹性供给与电价联动机制

在当前以低碳目标驱动的算网能一体化交易体系中，传统以电力

为中心的响应机制已难以支撑异构算力资源与多变电价环境下的高效协同调度。尤其是在算力任务灵活度提高、电价动态波动频繁的背景下，构建具备弹性调节能力的算力资源调度机制，并与电价联动成为实现系统优化的关键路径。算力弹性供给与电价联动机制本质上是一种将算力任务视作可调负荷的动态控制方式。系统根据实时电价波动，智能分析算力任务的调度优先级和延迟容忍性，在高电价阶段主动降低计算任务投入，或将非实时任务延后执行，以实现电网负荷的柔性响应。同时，在低电价时段系统可调动大量待执行任务集中运行，提升能源使用效率并降低整体能耗成本。该机制不仅提升了算网系统的经济性，也为用户提供了绿色低碳的用算环境。通过将弹性调度能力嵌入算力平台核心控制逻辑中，系统可实时感知电价变化并执行任务迁移策略，支撑算力资源与能源价格的协同演进，从而提升整体算网能系统的时空资源利用率。

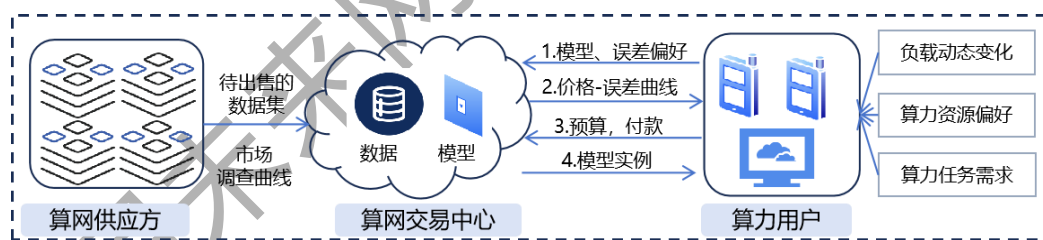


图 4-3. 算力弹性供给与电价联动机制示意图

(2) 用户侧储能+算力资源聚合模式

随着用户侧储能设备的普及和能算融合趋势的增强，构建面向多资源协同的“储能+算力”聚合机制成为提升用户侧响应效率的重要方式。该模式通过在本地区署储能设备，并与算力服务节点形成深度耦合，实现用户负荷在能源和算力层面的双重可调。系统在电价高峰

期调动储能释放能量支撑算力节点持续运行，避免因能耗成本过高而引发算力任务中断；而在电价低谷期，则集中调度大量算力任务运行，同时储能设备完成充电，形成良性的“能量蓄积-算力释放”循环。

此外，在碳交易或绿色能源优先消纳等制度背景下，该模式也可将绿色能源优先匹配至具备高能效比的算力节点，从而优化任务的碳排放路径。在实际系统运行中，“储能+算力”聚合机制常通过本地能源管理系统或边缘智能平台完成，具备高响应性和良好的可扩展性。资源调度策略则需综合考虑任务延迟容忍度、设备能效、储能状态、电价趋势等多因素进行动态优化，以确保资源匹配效率与经济收益最大化。该模式有效推动用户从能源消费者转变为灵活调节参与者，同时也为构建基于负荷聚合与资源交易的算网能互动平台提供了坚实基础。

4.4.2 创新算力能源交易模式

（1）虚拟电厂参与电力现货市场

在传统电力系统中，用户资源大多处于被动响应状态，缺乏对市场机制的主动适应能力。随着算力资源逐步具备调度性与市场交易属性，其与能源资源的融合也从辅助响应阶段进入到了正式交易阶段。算力能源交易模式即是在此背景下发展而来，通过构建面向市场化运行的资源交易体系，推动用户侧算力节点与电网侧现货市场、调度平台、综合能源管理系统实现直接联动。其中，“虚拟电厂参与电力现货市场”是最具代表性的机制形式之一^[12]。算力节点作为新型可调负荷，其任务运行的时间性和空间性为电力系统调峰调频提供了巨大的柔性空间。通过接入虚拟电厂聚合平台，用户侧算力设备可根据市场

电价信号提交可调负荷能力，并在电力现货市场中申报参与出清。系统可根据节点的历史运行曲线、服务等级、能耗特性等参数，对其调度能力进行动态评估与量化，形成可交易的负荷资源。

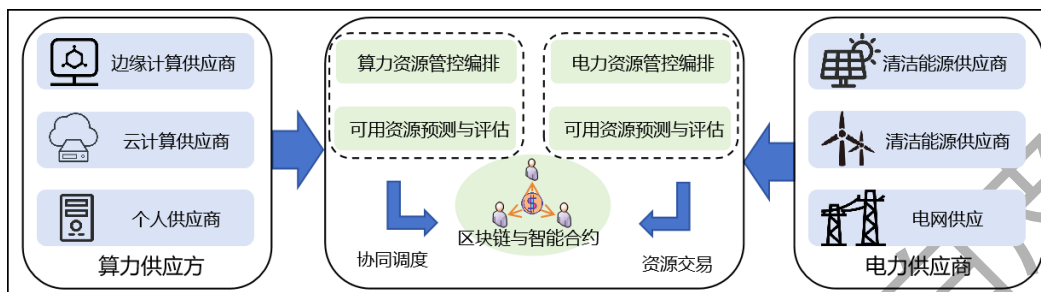


图 4-4 算力能源交易模式图

在调度过程中，虚拟电厂平台作为中介聚合方，承担起算力资源的预测、管理与交易撮合功能。一方面，它能够多个用户侧小型算力节点整合为具有规模效应的调节单元，以提高其市场议价能力；另一方面，通过嵌入区块链技术与智能合约协议，可实现交易过程的可验证与可追溯，确保算力任务调整的执行性与清结算的准确性。当电网侧发生负荷激增、频率波动或新能源出力波动时，系统即可调用这些具备“虚负荷”属性的算力节点进行即时卸载或迁移，以实现系统稳定性的快速恢复。这种交易模式打破了传统供需两端的刚性匹配边界，为算力市场与能源市场的融合提供了落地通道，也为用户侧资源价值释放创造了全新路径。

（2）能算一体化综合能源服务

在更为集成化的服务场景中，面向高等级负载聚集区域和绿色用能需求强烈的用户，构建“能算一体化综合能源服务”模式已成为当前系统创新的重要方向。该模式以算力调度平台为核心控制引擎，以储能设备、分布式可再生能源与区域电网为资源支撑，通过统一的资

源调配策略与能碳管理模型，实现从任务接收到能源调度、碳排跟踪、交易结算的全过程闭环控制。在这一体系中，算力服务不再孤立存在，而是作为综合能源服务的一部分，为用户提供低碳计算、绿色调度、能源优化等复合型解决方案。系统可根据用户任务的计算量、电价预测曲线与碳强度变化趋势，动态选择最佳的算力节点与能源路径，并通过智能合约完成服务部署与清算结算。用户不仅能够获得算力服务，还能同步享受绿色能源激励、电力成本优化及碳足迹减免等附加收益。

第九届未来网络发展大会白皮书

五、技术挑战与未来方向

在充分认识算电协同发展背景和应用场景的基础上，本章将深入剖析当前面临的核心技术挑战，并前瞻性地提出未来发展方向。通过“挑战-方向”的对应分析，为算电协同的技术创新和产业推进提供系统性指导。

5.1 技术挑战

5.1.1 系统复杂性，算电协同的纳管挑战

算电协同的一大核心技术挑战在于系统复杂性的指数级增长，这主要体现在跨层协同与异构资源整合的双重难题上。首先，系统需要实现从底层硬件到上层电网的多维度深度耦合：在硬件层面，需协调芯片级（如异构计算单元的动态电压频率调节）、服务器级（如液冷机柜的功耗-散热联动）与电网级（如需求响应信号）的实时交互；在软件层面，则要求调度算法能同时解析计算任务 QoS 需求、电力市场价格信号和碳排放约束等多目标参数。这种跨物理域、跨时间尺度的协同设计，使得传统分层优化方法面临严峻挑战。其次，在资源整合维度，云-边-端构成的异构算力网络呈现出“三高三低”特征——高异构性（从云端 FPGA 到终端传感器）、高动态性（边缘节点随时离网）、高不确定性（可再生能源波动），但同时又存在低耦合度（缺乏统一接口）、低可见性（局部资源状态不可观测）和低时效性（广域通信延迟可能达百毫秒级）。这种矛盾特性使得全局资源协调如同在时变拓扑网络上求解动态博弈问题，需要开发新型数字孪生平台来实

现“算力-电力-网络”三者的联合状态估计与预测性控制。

5.1.2 资源动态匹配，协同控制的核心难题

算电协同的另一大核心技术挑战在于资源动态匹配难题，这主要体现在两个方面：首先，算力需求的动态波动与电力供应的不稳定性（尤其是可再生能源的间歇性特征）需要实现实时精准平衡。由于算力负载往往呈现突发性和时变特性，而风电、光伏等清洁能源的输出受自然条件影响具有显著不确定性，二者在时空尺度上的动态匹配需要构建高响应的协同调控机制。其次，该问题本质上是一个多目标优化难题，需在性能（如计算任务完成率）、服务质量（如端到端延迟）和能源效率（如 PUE 指标）之间实现动态权衡。这要求设计具备在线学习能力的智能调度算法，既要考虑算力集群的异构性（如 CPU/GPU 的能效比差异），又要兼顾电力系统的运行约束（如电网调频需求），最终形成跨域资源的最优分配策略。

5.1.3 能效瓶颈，电力侧的关键制约

算电协同面临的第三大核心技术挑战是能效瓶颈问题，这主要体现在集中式与分布式计算场景的双重制约。在集中式高密度计算场景（如超大规模数据中心）中，随着算力密度的持续提升，散热与供电效率逐渐逼近物理极限——传统风冷散热已难以满足高性能计算芯片的热管理需求，而电力转换与传输损耗在总能耗中的占比显著增加，亟需通过液冷技术、高压直流供电等创新方案突破能效天花板。与此同时，在分布式边缘计算场景下，海量边缘节点的能源管理效率低下

问题日益凸显：由于边缘设备通常部署在供电条件受限的环境中（如基站、变电站），其能源供给往往依赖本地化可再生能源或电池储能，而分布式节点的异构性、间歇性工作模式以及缺乏全局协同调度机制，导致整体能源利用率低下。这种集中式与分布式的双重能效挑战，要求构建跨层级的能效优化体系，从芯片级（如异构计算架构）、设施级（如智能冷却系统）到系统级（如算力-电力联合调度）实现全栈创新。

5.1.4 安全与可靠性，交易机制的基础挑战

算电协同的第四大核心技术挑战聚焦于安全与可靠性的双重保障问题，这涉及物理层和网络层的复合风险。在物理可靠性层面，电力系统的固有波动特性（如电压暂降、频率闪变等电能质量问题）与计算设备的精密运行需求存在根本性矛盾——毫秒级的电压扰动可能导致服务器集群的批量宕机，而可再生能源的大规模接入进一步加剧了电网的不确定性。这要求构建具备“算力-电力”状态感知能力的韧性架构，通过智能 UPS（不间断电源）、分布式储能与算力迁移的协同响应，实现从“供电中断耐受”到“供电质量敏感”的可靠性升级。在网络安全性维度，算电融合显著扩大了系统攻击面：一方面，计算侧的数据隐私可能通过电力侧信息（如功耗指纹）被逆向推导；另一方面，电网关键控制信号可能因算力平台的漏洞遭受供应链攻击。这种“数据流”与“电力流”的深度耦合，使得传统孤立防护体系失效，亟需发展基于零信任架构的跨域安全防护技术，包括可信执行环境（TEE）与电力物理隔离装置的联合部署、以及面向算电协同的入

入侵检测系统（IDS）——该系统需能同时识别 APT 组织对服务器的网络渗透和针对变电站的虚假数据注入攻击。这种安全可靠性的多维保障，成为算电系统能否规模应用的关键前提。

本节从系统复杂性、资源匹配、能效瓶颈和安全可靠性四个维度，全面分析了算电协同面临的技术挑战，为后续发展方向的确立提供了问题导向。

5.2 未来发展方向

面对这些挑战，需要从技术创新、系统架构和市场机制等多个层面寻求突破，以下将具体阐述五大未来发展方向。

5.2.1 智能调度技术从单目标优化迈向多模态协同，推动算力网络向全域资源动态匹配演进

未来算电协同的重要发展方向在于智能调度与优化技术的突破，其核心在于利用人工智能和数字孪生技术实现电力与算力资源的高效动态匹配。一方面，基于强化学习、联邦学习等 AI 算法的预测性调度系统将成为关键，能够实时分析算力需求波动（如突发性 AI 训练任务）与可再生能源发电（如风电、光伏的间歇性输出）的时空关联性，并动态优化资源分配策略。例如，通过数字孪生构建“算力-电力”虚拟映射，结合强化学习的在线训练能力，可在满足计算任务 SLA（服务等级协议）的同时，最大化清洁能源消纳比例。另一方面，随着分布式能源（如屋顶光伏、分布式储能）和边缘计算节点的广泛部署，本地化协同将成为重要趋势。通过设计“光储算”一体化微电网

架构，使边缘数据中心能够根据本地可再生能源发电情况动态调整计算负载（如延迟容忍型任务的错峰执行），甚至通过算力节点的灵活启停参与电网需求响应，实现“计算即负荷”的能源互联网新范式。这一方向的发展将显著提升算电系统的经济性和可持续性，但也面临分布式系统状态估计精度、多主体博弈均衡等关键技术挑战。

5.2.2 绿色计算技术从能效提升转向全生命周期减碳，零碳数据中心架构加速普及

未来算电协同的另一关键发展方向是绿色计算与能源创新的深度融合，其核心在于通过跨领域技术突破实现算力基础设施的能效革命与清洁化转型。在硬件能效维度，液冷/浸没式散热技术将逐步替代传统风冷方案，通过相变材料与微通道设计的结合，使 PUE（电能使用效率）突破 1.05 的理论极限；同时，存算一体芯片、近阈值电压计算等低功耗架构的成熟，将重构计算设备的能耗范式——例如基于 3D 堆叠存储器的存内计算可减少 90% 的数据搬运能耗。在供电架构层面，高压直流配电与固态变压器的规模化应用，有望将电能转换损耗从当前的 15% 降至 5% 以下，形成“芯片级-机柜级-园区级”的三级高效供能体系。

在能源协同维度，面向算电协同的可再生能源消纳技术将成为突破重点：一方面，通过波动性适配算法（如基于 LSTM-GAN 混合模型的发电出力预测），使计算负载曲线主动追踪光伏/风电的波动特性，实现“算力跟随电力”的动态调度；另一方面，探索算力设施作为电网柔性负载的新模式——如数据中心集群通过调节批处理任务时序

参与电网调频，或利用异构计算单元（CPU/GPU/FPGA）的差异化能效特性构建虚拟储能池。这类创新不仅需要突破跨域建模技术（如统一量化计算任务与电力调节的价值当量），还需建立算力-电力市场的联合出清机制。最终，通过“硬件能效革新+系统协同优化”的双轮驱动，推动算电系统迈向“零碳计算”的新纪元。

5.2.3 边缘计算与微电网从独立部署走向深度耦合，构建区域性能电自平衡单元

未来算电协同的重要演进方向在于边缘计算与微电网的深度耦合，这将重塑分布式算力与能源系统的协同范式。在架构层面，边缘节点将演变为“算力-电力双枢纽”，通过集成分布式能源控制器（DERMS）与算力调度器，实现区域内计算负载与可再生能源的闭环优化——例如 5G 基站搭载“光伏+储能系统”时，可基于业务流量预测动态调节边缘服务器的供电模式，使 80% 以上的计算需求由本地绿电直接支撑。在服务能力维度，这种融合创造了“能源自洽型边缘计算”新形态，通过构建细胞化算电单元（Cell-based Computing-Power Grid），既能保障自动驾驶、工业 AR 等场景的毫秒级响应，又可实现区域能源的 90% 以上自给率。

在系统韧性方面，面向算力突发的微电网弹性设计成为关键突破点：一方面采用“异构储能矩阵”架构（如飞轮+锂电池+超级电容混合储能），通过多时间尺度能量缓冲匹配计算负载的秒级至小时级波动；另一方面开发“算力感知型保护系统”，当边缘数据中心突发热点事件（如大型模型推理请求激增）时，可智能触发微电网的孤岛运

行模式，并优先保障 GPU 集群的供电质量。这种深度协同需要攻克两大技术瓶颈：一是建立计算任务 QoS 与电力系统稳定性指标的跨域等价模型，二是开发支持 10 万级边缘节点协同的分布式共识算法。最终形成的“边缘算力微电网”生态，将实现从“电力支撑计算”到“算电共生”的范式跃迁。

5.2.4 政策体系从单一激励升级为多维生态构建，算力-电力协同治理框架初步成型

未来算电协同的可持续发展离不开政策与生态体系的系统性构建，这需要从标准体系与市场机制两个维度进行突破。在标准化建设方面，亟需建立跨行业的融合性技术标准：一方面需制定算力碳足迹的精准计量规范，统一量化从芯片指令集到数据中心集群的碳排放当量（如基于 PUE 与碳强度指数的动态折算方法）；另一方面要设计算电协同接口协议，涵盖电力需求响应信号与计算任务优先级的映射规则、异构算力资源的电网调频能力认证等。例如，通过 IEEE 与 IEC 联合工作组推动《算力-电力互操作白皮书》，解决当前“计算无碳标、电力无算力”的双轨制困境。

在市场机制创新维度，算力与电力资源的市场化交易模式将成为关键探索方向：一是构建算力可调节容量市场，允许云服务商将闲置算力（如夜间 GPU 集群）以虚拟储能形式参与电力辅助服务交易；二是试点算电联合出清机制，在电力现货市场中引入计算任务延迟容忍度作为报价参数，形成“算力需求侧响应”的新型市场品种。这类创新需要政策端突破现有行业壁垒——如允许数据中心运营商获取

售电牌照，或制定算力负荷聚合商的准入规范。最终通过“标准牵引+市场驱动”的双轮机制，培育出涵盖设备商、运营商、交易平台的算电协同生态系统，实现从技术融合到商业闭环的跨越。

5.2.5 量子计算与 AI 大模型赋能调度系统，突破传统优化算法的算力瓶颈

未来算电协同的创新发展还将深度依赖前沿技术的融合应用，特别是在可信交易与复杂优化两大关键领域。在能源-算力交易方面，区块链技术的去中心化协作能力将重构市场信任机制——通过部署智能合约驱动的交易引擎，可实现分布式算力资源（如边缘节点闲置 CPU 周期）与微电网绿电的原子级交易：例如基于 Hyperledger Fabric 构建的联盟链平台，能够自动执行“发电预测-算力预约-绿电交割-碳迹追溯”的全流程，在保证交易透明性的同时将结算延迟压缩至亚秒级。更值得关注的是，区块链与物联网的融合将催生算力资源证券化新模式，使 GPU 算力、储能容量等抽象资源转化为可拆分交易的数字资产。

在优化计算领域，量子计算的革命性潜力有望突破传统算力瓶颈：一方面，量子退火算法可高效求解百万级变量的“算力-电力”联合调度问题，在多项式时间内完成传统超算需数小时运算的 NP 难问题（如含随机新能源出力的鲁棒优化）；另一方面，量子机器学习将赋能跨域预测模型，通过量子神经网络同时处理电力负荷曲线与算力需求图谱的万亿级关联特征。当前需重点突破量子-经典混合计算架构，开发适配 NISQ（含噪声中等规模量子）设备的协同优化算法，为算电系

统提供“量子优越性”加持。这两大技术的融合应用，将推动算电协同从“资源耦合”迈向“价值共生”的新阶段。

本章构建了完整的“挑战-对策”分析框架，系统性地提出了算电协同的发展路径。智能调度技术解决资源匹配难题，绿色计算技术突破能效瓶颈，边缘计算与微电网耦合应对系统复杂性，政策体系构建保障安全可靠，量子计算与 AI 大模型则为全面突破提供前沿支撑。这些方向相互关联、互为支撑，共同推动算电协同向更高效、更绿色、更智能的方向发展。

5.3 算力电力协同发展建议

（一）强化政策支撑与体制机制创新

当前我国算电协同发展仍处于关键起步期，亟需完善顶层设计与政策保障体系。建议由国家相关部委组织建立跨部门协调机制，制定《算力电力协同发展三年行动计划》，明确 2025-2030 年分阶段实施路径。重点在“东数西算”工程八大枢纽节点推行“算力-绿电”绑定政策，将新建数据中心绿电使用比例提升至 80%以上。同时创新资金支持模式，设立国家级算电协同发展基金，采用财政补贴与市场化融资相结合的方式，对符合 $PUE \leq 1.25$ 、绿电占比 $\geq 50\%$ 的示范项目给予最高 30% 的建设补贴，并支持算力负荷参与电力辅助服务市场交易。

（二）构建标准化技术体系与创新生态

技术标准体系的统一是算电协同发展的基础保障。建议由电促会、信通院等机构牵头，制定《算力-电力协同接口技术规范》，重点解决

三大关键问题：建立算力可调节容量计量标准，明确 1 万 GPU 时相当于 2MWh 电网调节能力的折算方法；统一电力-算力协同调度协议，基于图 2-1 所示的功能架构实现跨系统互联互通；完善碳排放动态折算体系，开发基于实时碳足迹因子的精准计量模型。在技术创新方面，应重点突破异构算力动态纳管技术、新能源出力与算力负载联合预测算法等核心难题，将预测误差控制在 5% 以内，同时加快区块链技术在算电交易平台中的应用，实现绿电溯源与碳足迹全生命周期追踪。

（三）打造示范工程与产业协同新模式

选择青海、内蒙古等新能源富集区域建设 3-5 个国家级“零碳算力示范区”，形成可复制推广的典型经验。示范工程应实现三大目标：通过算力负荷就地消纳风光电力，参照青海柴达木 100% 绿电中心的成功案例；规模化应用液冷散热与余热回收技术，将 PUE 控制在 1.1 以下；提升算力参与电网调频的响应能力，确保响应时间小于 200 毫秒。在商业模式创新方面，重点培育“虚拟电厂+算力聚合商”新型业态，探索电力-算力-碳权捆绑交易机制，形成多元价值变现渠道。

（四）健全评估体系与安全保障机制

建立科学的算电协同度评价指标体系（SEI），从能源匹配度、调度协同性、经济效益、技术创新和生态效益五个维度开展动态评估。其中能源匹配度重点考核绿电占比与新能源消纳率指标，权重设为 30%；调度协同性主要评估响应速度与任务迁移成功率，占 25% 权重；经济效益关注度电成本与碳减排收益，占 20% 权重。在安全保障方面，构建“电力-算力”融合防护体系，电力侧部署量子加密通信设备，算

力侧建立 TEE 可信执行环境，协同层开发跨域入侵检测系统，形成三位一体的安全防护网络。通过政策引导、标准先行、示范带动、评价保障的系统推进策略，最终实现"比特驱动瓦特，瓦特赋能比特"的协同发展愿景，预计到 2030 年带动相关产业规模突破万亿元。

第九届未来网络发展大会白皮书

参考文献

- [1] 郭力争, 张翼飞, 赵曙光. 数据中心环境下能耗性能感知的优化方法[J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(s1): 72.
- [2] 熊伟, 李兵. 云计算环境下基于能耗感知的弹性资源管理机制[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 112-116.
- [3] 罗亮, 吴文峻, 张飞. 面向云计算数据中心的能耗建模方法[J]. 软件学报, 2014, 25(7): 1371-1387.
- [4] Rossi M, Brunelli D. Forecasting data centers power consumption with the Holt-Winters method[C]// 2015 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS) Proceedings. IEEE, 2015: 210-214.
- [5] Smpokos G, Elshatshat M A, Lioumpas A, et al. On the energy consumption forecasting of data centers based on weather conditions: Remote sensing and machine learning approach[C]// 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP). IEEE, 2018: 1-6.
- [6] 工业和信息化部. 数据中心绿色低碳发展行动计划[EB/OL]. 2021.
- [7] 国家能源局. 2023 年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. 2024-01-25.
- [8] 国家电网公司能源研究院. 算力设施与电力系统融合研究报告(2023) [R].
- [9] 中国电子节能技术协会. 中国绿色数据中心发展白皮书(2023)[R].
- [10] Uptime Institute. Global Data Center Survey 2023[R].
- [11] 刘志刚, 刘宝琛. 算力资源柔性调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14):174-183.
- [12] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快推动新型电力系统发

展的指导意见[EB/OL]. 2021.

第九届未来网络发展大会白皮书