



未来网络发展大会

FUTURE NETWORK
DEVELOPMENT CONFERENCE

NANJING · CHINA / 中国 · 南京

未来网络白皮书

算网能一体化白皮书 (2024版)



中国电力工程顾问集团有限公司、北京邮电大学、紫金山实验室

2024年8月

版权声明

本白皮书版权属于中国电力工程顾问集团有限公司和网络通信与安全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：中国电力工程顾问集团有限公司、北京邮电大学和紫金山实验室”。否则将违反中国有关知识产权的相关法律和法规，对此中国电力工程顾问集团有限公司、北京邮电大学和紫金山实验室有权追究侵权者的相关法律责任。

编委会

专家指导组成员

刘韵洁 中国工程院院士、紫金山实验室首席科学家

罗必雄 中国能源建设集团首席科学家，电力规划设计总院院长

张力 中国电力工程顾问集团有限公司首席科学家

李刚 中国电力工程顾问集团有限公司中电海洋能源工程技术研究院院长

孙斌 中国电力工程顾问集团有限公司副总工程师

史磊 中国电力工程顾问集团有限公司中电碳中和发展研究院副院长

句赫 中国电力工程顾问集团有限公司中电数据与信息研究院院长

黄韬 北京邮电大学教授

编制组成员

中国电力工程顾问集团有限公司

冯运超、李舒涛、周倩、吴冬、杨天翔、何应东、吴晓帆、仝超、李晓宇、刘建伟

北京邮电大学

谢人超、唐琴琴、文雯、李硕、胡珉昊、李敏宽、孙思齐

紫金山实验室

彭开来、汤雅婷、邵子豪、刘辉、张翔、邱伟、贾庆民

前 言

随着算力网络的飞速发展，数据资源存储和算力的需求爆发式增长，算力网络自身的能耗和碳排放激增，传统算力网络缺乏有效的绿色计算策略，在面对能源的波动性和不可预测性、能源交易与算力交易难以协同等挑战时存在明显不足，难以优化算网与能源基础设施和应用的时间和空间布局，无法匹配实时与非实时、可变与刚性的能源供给和算力需求。因此，“算网”和“能源”如何协同创新，以支撑能源智能生产调度体系，实现源网荷互动、多能协同互补及用能需求智能调控，是当前业界面临的重要课题，也是国家“东数西算”和“双碳”战略的攻关指向。

在算电协同的思想指导下，为实现绿色计算，解决算力网络能耗和碳排放过大的问题，需要聚焦算电协同中的源网荷储，在算力网络的基础上考虑能源要素，因此推出了算网能一体化这一概念。本白皮书首先详细阐述了算网能一体化的发展背景、参考架构、关键使能技术，同时介绍了算网能一体化的典型应用场景，并探讨了算网能一体化发展面临的挑战和发展建议。目前，工业界和学术界对算网能一体化的研究尚处于起步阶段，并仍处于快速发展之中，因此本白皮书还存在需要不断完善的地方，真诚地企盼读者批评指正。

《算网能一体化白皮书》是算网能系列白皮书之一，该系列后续拟推出以下白皮书：

- a) 《算网能智一体化发展白皮书》

- b) 《算网能一体化运营白皮书》
- c) 《物联网算网能一体化白皮书》
- d) 《算网能智能优化白皮书》
- e) 《算网能一体化服务拓展白皮书》
- f) 《算网能开放性服务发展白皮书》

《算网能智一体化发展白皮书》：聚焦于智能化发展方向，主要探讨如何通过人工智能和机器学习等技术提升算网能一体化的智能化水平。此白皮书旨在为智能调度和管理提供创新方案。

《算网能一体化运营白皮书》：关注算网能一体化的实际运营和管理，讨论运营中的具体挑战和解决方案，提供实际操作指南和最佳实践案例。

《物联网算网能一体化白皮书》：探讨物联网技术在算网能一体化中的应用，研究如何通过物联网实现更高效的数据收集、传输和处理，以支持算力和能源的协同优化。

《算网能智能优化白皮书》：专注于智能优化技术，研究如何利用算法和技术手段实现算力和能耗的最优化配置，提升系统的整体效率和可持续性。

《算网能一体化服务拓展白皮书》：讨论算网能一体化在不同服务领域的拓展应用，探索如何通过服务创新拓展应用场景，实现更广泛的行业覆盖和用户需求满足。

《算网能开放性服务发展白皮书》：研究开放性服务的框架和模

式, 探讨如何通过开放平台和标准化服务实现算网能一体化的更大规模应用和推广, 促进产业生态系统的形成。

通过以上白皮书, 希望能够系统性地解决算网能一体化面临的各种问题, 从智能化发展、运营管理、物联网融合、智能优化到服务创新和开放性服务, 每个方面都有较为详细的探讨和指导, 为行业提供全面的参考和支持。

目 录

前 言.....	I
目 录.....	IV
一、 算网能一体化背景	1
1.1 算网能一体化概念和特征	1
1.2 算网能一体化研究意义	4
1.3 需求分析	9
1.3.1 国家战略需求分析	9
1.3.2 产业发展需求分析	11
1.3.3 技术演进需求分析	13
1.3.4 用户需求分析	14
1.3.5 功能需求分析	15
1.4 算网能一体化发展目标	17
二、算网能一体化架构	21
三、算网能一体化关键技术	25
3.1 算网能资源感知模型	25
3.2 算网能资源度量模型	27
3.3 算网能一体化调度机制	29
3.4 算网能一体化交易机制	31
3.5 算网能一体化安全保障机制	32
3.6 算网能一体化自智技术	33

四、算网能一体化应用场景	36
4.1 智慧能源管理	36
4.2 智能微网	37
4.3 绿色数据中心运营管理	39
4.4 智能制造	40
4.5 智慧医疗供应链	41
4.6 智能大模型能算协同	42
4.7 自动驾驶能源数据管理	43
4.8 轨道卫星智能组网	44
4.9 战术网络	46
五、算网能一体化发展建议	48
5.1 发展阶段划分	48
5.1.1 起步阶段	48
5.1.2 整合阶段	48
5.1.3 智能化阶段	49
5.1.4 生态化阶段	49
5.2 发展建议	49
六、总结与展望	51
参考文献.....	52
附录 A：术语与缩略语.....	57

一、算网能一体化背景

本白皮书创新提出“算力(Computing)”“网络(Communication)”和“能源(Energy)”三要素一体化(Integration) (“CCEI”)模型和架构。算网能一体化是在算电协同的思想下,为解决算力网络能耗和碳排放问题以实现绿色计算,而提出的一个概念,具体是指算力、网络和能源的协同发展与统一调度,通过智能算法和大数据分析等,实现资源的互联互通、共享利用和优化调控,并推动各领域深度融合和可持续发展的新趋势。本白皮书阐述了算网能一体化的背景、体系结构、关键技术、应用场景、发展建议,旨在为有兴趣了解算网能一体化概念和技术的研究人员提供介绍与指导。具体而言,本章从算网能一体化概念和特征入手,进一步分析算网能一体化的研究意义和各种需求,并提出算网能一体化的发展目标。

1.1 算网能一体化概念和特征

算网能一体化可以简单地理解为算力、网络和能源三者的协同发展,更深层次的含义是指以通信网络设施、异构计算设施和能源基础设施协同发展为基石,将诸如算力、网络、数据与能源等多种资源进行统一编排管控调度,实现计算、网络和能源的互联互通、共享利用,并支持对能源进行智能调控和优化,推动各领域深度融合和创新发展的新趋势和新业态。此外,算网和能源之间相互影响。能源是算

力设施（如数据中心、服务器）和网络设施（如基站、路由器）运行的基础。没有足够的能源供应，这些设施将无法正常运转。例如，一个数据中心需要大量的电力来支持其服务器的运行、冷却系统的运转以及其他辅助设备的工作。通过应用可再生能源（如太阳能、风能），可以减少算力和网络设施的碳排放，提高能源利用效率，推动可持续发展。反过来，算力和网络能够对能源使用进行优化。通过智能算法和大数据分析，算力和网络设施可以实现能源的智能调度和优化使用。例如，根据能源供需情况，动态调整数据中心的工作负载，将高耗能任务安排在能源供应充足的时段和区域，从而实现能效最大化。算力和网络设施可以实现负荷的动态转移，以平衡能源使用。例如，当某个区域的能源供应紧张时，可以将部分计算任务转移到能源供应相对充足的区域，减轻当地能源系统的负荷。

算网能一体化的本质是一种一体化资源、一体化设施和一体化服务。一是算网能一体化是一种整合算力、网络和能源的一体化资源。算网能一体化将计算、网络和能源等资源进行统一编排和管理，实现资源的共享和优化配置，提高资源利用率，降低能耗，使其能够更好地适应各类应用场景的需求以支撑上层应用。二是算网能一体化是一种聚焦“计算”+“网络”+“能源”的一体化设施。算网能一体化基础设施以云计算数据中心、智能计算中心、高性能计算中心等算力设施为支点，依托通信网络基础设施打造能力底座，集成风光水电等能源设施，同时融合人工智能、大数据等技术，实现设施的协同工作和

资源共享，降低建设和运维成本。三是算网能一体化是集成弹性、敏捷和安全的一体化服务，具体包括算力即服务、连接即服务和能源即服务。

算网能一体化的特征可以分为网能一体化、算能一体化、数据协同、运维协同、智能协同和服务协同。

- 网能一体化：依托通信网络，通过在网络协议、网络架构及网络模型等方面进行集约化改进，提升网络对计算的感知能力，实现云、网、边、端的一体化融合与连接。同时采用绿色能源和能源管理技术，降低网络运行过程中的能源消耗，推动绿色低碳的网络发展。
- 算能一体化：整合云计算、边缘计算及 AI 计算等多种计算方式，汇集异构芯片的处理能力，达成基础算力的统一衡量。同时引入绿色能源，并采用源网荷储等技术，提高算力设施的绿电使用率，建立绿色低碳的算力应用体系。
- 数据协同：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。
- 运维协同：通过协调管理、调度及编排网络、计算、能源等多种资源，根据各类服务场景的运维需求进行建模，创建场景化的运维模型，提升运维效率和资源利用率。

- 智能协同：整合人工智能、大数据及区块链等前沿技术，建设具备意图感知与数字孪生等自学习能力的智能中台，形成智能核心，提升算网能一体化系统的智能化水平，实现智能决策和自动化运营。
- 服务协同：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、智能化的应用场景。

1.2 算网能一体化研究意义

近年来，我国数字经济蓬勃发展，各行业都在不断深化数字化转型。人工智能（Artificial Intelligence, AI）、区块链、物联网等数字技术广泛运用，导致全社会数据量大幅增长，对数据存储、处理、传输和应用的需求也随之增加。算力成为新的生产力，因此我国极为重视算力基础设施建设，在“十四五”规划中明确提出了加快构建全国一体化大数据中心体系的目标。并且国家陆续发布了一系列政策文件，系统地推进一体化大数据中心协同创新体系和算力枢纽体系的建设工作，同时启动“东数西算”工程。

“东数西算”项目加速了数据中心的生长，因此也带动了数据中心年用电量的增加。国家发改委指出，在算力基础设施建设和应用领域，降低能源消耗和减少碳排放是一个必须解决的问题。政府鼓励采

取一系列的方法来提高资源利用效率和数据中心的碳排放效率，同时推动市场使用更环保、低碳的算力资源，以进一步减少能源消耗和碳排放。因此，针对算力与能源领域如何协同创新，开展感知、度量和调度的相关研究工作，推动未来将算力和电力在规划与运行中更紧密地结合，促进它们共同发展，以建立更智能、高效、环保的数据中心体系，进而达成双碳目标，为经济社会的稳定发展提供更为可持续的动力与支持就显得尤为重要。

同时党的二十大报告提出，加快发展方式绿色转型，发展绿色低碳产业，倡导绿色消费，推动形成绿色低碳的生产方式和生活方式，同时强调要大力发展数字经济，建设数字中国。绿色电力和算力作为经济社会全面绿色化、数字化转型的关键生产力，正逐步向“融合共生”发展，通过电力带动算力绿色化升级、算力赋能电力数字化转型，形成螺旋上升的良性循环，推动能源数字经济高质量发展。

算电协同在这种背景下应运而生，算电协同是指算力电力协同融合创新，主要的特点是电网给算场算网供电，算网为电网供算力，算场闲置的电力也可以反向给电网输送，在节点、市场和网络调度三个层面进行有机协同，电力网和算力网间实现电力、算力调度“两融合”，助力实现安全稳定、绿色低碳的高质量发展。其中推进绿色电力与算力联合调度是其中重要一环，源网荷储一体化项目是算电协同的关键抓手，而以“节点-市场-网络”融合为架构，是算电融合发展的方向。算网能一体化概念则是在算电协同的思想指导下所提出的，针对解决

算力网络中的能耗和碳排放问题，以实现绿色计算。算网能一体化作为算电协同的细化，以通信网络为支撑，通过资源和任务调度降低传输和处理任务的能耗和碳排。

算网能一体化聚焦于推动算力网络的可持续发展，通过对算力、网络与能源的整合研究，旨在优化算力网络的运作方式，实现更为高效、智能的资源分配与利用。其次，算网能一体化关注如何降低能源浪费，提升能源利用效率。通过算网能一体化的创新研究，力求开发出高效的调度策略和能源利用模式，从而减少不必要的能源消耗，有助于降低算力网络的整体能耗。这不仅符合国家节能减排的政策要求，也有助于降低数据中心的运营成本，提高其经济效益。此外，算网能一体化着眼于提高资源利用效率。通过对算力网络负载与能源供给侧的联动优化调度机制的研究，旨在实现更精准的资源分配和利用，提高算力网络资源的利用率，降低资源浪费。并且算网能一体化有助于构建更加智能化和灵活的算力基础设施。在算力需求不断增长的情况下，传统的计算资源调度模式已经难以满足高效、低延时的需求。通过算网能一体化，可以实现算力资源的动态调度和实时调整，提升计算任务的执行效率。同时，智能调度系统能够根据实时的能源供应情况和算力需求，优化能源使用，避免不必要的能源浪费。算网能一体化能够促进绿色计算的发展。随着全球气候变化问题的加剧，减少碳排放成为各国共同关注的焦点。算网能一体化通过将可再生能源引入算力网络的能源供应体系，推动数据中心采用低碳、环保的能源解决

方案。例如，利用风能、太阳能等可再生能源，可以有效降低数据中心对传统化石能源的依赖，减少碳排放量，助力国家实现“双碳”目标。此外，算网能一体化还有助于提升大数据应用的社会价值。通过更高效的算力和能源管理，能够支持更多创新应用的落地，如智慧城市、智慧交通、智能制造等。这些应用不仅能提高社会运行的效率和质量，还能为经济社会的可持续发展提供强有力的技术支撑。

总的来说，算网能一体化的研究意义主要在于以下几个方面：

（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。通过算网能一体化的管理和协同发展，能够实现算力、网络和能源资源的最佳配置和利用。这将促进整体效率和性能的提升，为各行业提供更强大的数据处理和分析能力。具体而言，算网能一体化能够通过智能调度和动态分配资源，避免资源浪费，提高资源利用率。例如，在高峰期，可以将更多的算力和网络资源分配给急需的业务，同时在低峰期合理减少资源投入，从而实现资源的最大化利用。

（2）降低能源消耗：在数据中心和网络设施中，能源是一个非常重要的资源。通过算网能一体化，可以实现能源的智能调控和优化，降低能源消耗，减少环境影响。这符合国家对于能源节约和减排的要求，也为可持续发展提供了支持。通过应用先进的能源管理技术和算法，如负载均衡、智能温控和能效优化等，可以显著降低数据中心的能耗。例如，采用液冷技术和优化的气流管理，可以有效降低数据中心的制冷能耗，从而减少整体能源消耗。

(3) 提升服务质量：算网能一体化可以实现算力、网络和能源的互联互通，共享资源，提高服务的响应速度和质量。对于用户来说，这意味着更快速、更可靠的服务体验，满足了用户对高性能和高可靠性的需求。通过统一管理和调度各类资源，可以减少服务延迟，提高数据处理速度，增强系统的容错能力和稳定性。例如，在面对突发的高流量请求时，系统能够迅速响应并动态调整资源分配，确保服务的连续性和稳定性。

(4) 支持新业务模式：一体化的算网能架构能够为新兴领域的业务模式提供支持，例如生成式人工智能（Artificial Intelligence Generated Content, AIGC）和物联网等。这有助于推动数字经济的蓬勃发展，为创新和新业务的孵化提供基础。具体来说，算网能一体化可以为这些新业务提供高效的数据处理和传输能力，支持其大规模数据分析和实时处理需求。例如，AIGC 需要大量的算力和数据传输带宽，算网能一体化可以通过优化资源分配和管理，满足其对高性能计算和低延迟通信的需求

(5) 提高系统灵活性：算网能一体化能够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。这使得数据中心能够适应不断变化的业务需求和环境条件，提供更灵活、可靠的服务。通过使用虚拟化和容器化技术，可以实现资源的快速部署和迁移，减少系统的停机时间和维护成本。例如，当某个服务器出现故障时，可以迅速将其工作负载迁移到其他服务器上，确保服务的连续性和可靠性。

(6) 降低管理成本：通过统一编排管控调度多种资源，可以简化管理流程，降低管理成本，提高管理效率和可维护性。这使得数据中心能够更好地应对大规模数据存储、处理和传输的需求，并满足复杂的业务场景。通过自动化运维和智能监控技术，可以减少人工干预，降低人力成本，并提高系统的可靠性和稳定性。例如，通过自动化脚本和工具，可以实现对数据中心的远程管理和故障排除，减少现场维护的需求。

算网能一体化是一种有利于提高资源利用效率、降低能源消耗、提升服务质量、支持新业务模式、提高系统灵活性和降低管理成本的发展趋势，对于推动数字化和绿色低碳转型以及促进信息技术的创新具有重要意义。随着技术的不断进步和应用场景的扩展，算网能一体化将进一步发挥其重要作用，推动社会和经济的可持续发展。

1.3 需求分析

算网能一体化是在各种需求的推动下产生的，本节将从国家战略需求、产业发展需求、技术演进需求、用户需求和功能需求五个方面进行分析。

1.3.1 国家战略需求分析

随着我国数字经济的迅速崛起，数字化转型深入各行业，新兴业务如增强现实（Augmented Reality, AR）/虚拟现实（Virtual Reality, VR）、自动驾驶、远程医疗和人工智能大模型等对网络的计算和数据

传输能力提出了更高要求。算力作为新型生产力，其重要性日益凸显，我国也在大力推动算力基础设施的建设和布局。

近年来，国家出台了一系列重要政策，如《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023年）》《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》《“十四五”国家信息化规划》《“十四五”数字经济发展规划》等，系统性地规划了我国一体化大数据中心协同创新体系和算力枢纽体系，推进云网协同和算网融合发展，促进基础设施智能升级。在京津冀等8个地区，国家启动了算力枢纽节点建设，并规划了10个国家数据中心集群，全面启动“东数西算”工程，通过统筹全国算力资源，将东部地区的数据计算需求合理分配到西部地区，优化数据中心布局，促进东西部协同发展，实现算力资源的高效利用。

“东数西算”工程助推数据中心快速发展，但数据中心的能耗问题也日益受到重视。在碳达峰、碳中和的背景下，国家发改委鼓励企业通过优化建设运维模式、技术升级和利用可再生能源等方式降低数据中心的能耗和碳排放。《算力基础设施高质量发展行动计划》同样强调了绿色低碳发展的理念，提升算力设施的能源利用效率和算力碳效水平。

建设能源算力网络是实现“东数西算”工程的关键任务。通过构建数据中心、能耗、网络协同融合的新型算力网络，将东部算力需求

有序引导到西部地区，优化数据中心布局，促进东西联动，实现算力的高效调度和使用。具体措施包括：全国算力统筹和调度，灵活整合算力资源，配套可再生能源，规范行业绿色化发展。

能源算力网络围绕“东数西算”战略工程，解决当前互联网面临的主要问题，开展互联网体系结构的创新研究，探索适合我国未来能源算力网络发展的技术路线和发展道路。算网能一体化不仅是技术创新的需要，更是国家战略发展的需求，通过优化资源配置，降低能源消耗，提升服务质量，支持新业务模式，增强系统灵活性和降低管理成本，算网能一体化将为我国数字经济和绿色低碳转型提供强有力的支撑，为信息技术的创新和应用开辟广阔的前景。

1.3.2 产业发展需求分析

工业和信息化部等六部门联合印发《算力基础设施高质量发展行动计划》，计划指出要加快建设能源算力应用中心，支撑能源智能生产调度体系，实现源网荷互动、多能协同互补及用能需求智能调控。推动鼓励龙头企业以绿色化、智能化、定制化等方式高标准建设数据中心，充分利用现有能源资源优势，结合自身应用需求，提供“能源流、业务流、数据流”一体化算力。同时计划强调要提升资源利用和算力碳效水平。持续开展国家绿色数据中心建设，鼓励企业加强绿色设计，加快高能效、低碳排的算网存设备部署，推动软硬件协同联动节能。支持液冷、储能等新技术应用，探索利用海洋、山洞等地理条件建设自然冷源数据中心，优化算力设施电能利用效率、水资源利用

效率、碳利用效率，提升算力碳效水平；引导市场应用绿色低碳算力。积极引入绿色能源，鼓励算力中心采用源网荷储等技术，支持与风电、光伏等可再生能源融合开发、就近消纳，逐步提升算力设施绿电使用率。加快探索构建市场导向的绿色低碳算力应用体系，推动业务模式、计费模式和管理模式创新；赋能行业绿色低碳转型。推动算力设施在工业等重点行业发挥应用赋能作用，支撑行业数据分析、动态监测、工艺优化等生产环节创新，促进企业经营活动数字化、智能化发展，助力行业节能减排，构建“算力+”绿色低碳生态体系，降低社会碳排放总量。

由此可见，随着绿色数据中心建设需求的逐渐增加，企业将越来越重视绿色设计和部署高效能、低碳排放设备。通过对算力中心的设计、建设、技术选型以及设备选择等方面的引导，逐步提升算力的碳效水平将成为行业共同的追求。市场对绿色能源的需求也将呈现逐步增长的趋势。为了满足这一需求，算力中心需要积极采用技术手段，整合可再生能源，并实现可再生能源的融合开发和就近消纳，从而提高绿色电力在设施中的使用率。在重点行业中，对算力设施的应用赋能作用将成为关注焦点。这意味着需要支持生产环节的数据分析、监测和优化，以实现数字化、智能化发展。通过这些举措，行业可以降低能源消耗和碳排放，构建起“算力+”的绿色低碳生态体系，推动行业朝着绿色低碳的方向迈进。

1.3.3 技术演进需求分析

随着以 AIGC（生成式人工智能）为代表的人工智能应用、大模型训练快速崛起，带动智能算力需求爆发式增加。同时，在我国数据中心快速发展的推动下，基础算力规模仍将持续增长。基础算力、智能算力、超算算力相互融合渗透，以满足多样化智能场景对多元化算力的需求。而大规模算力发展需要消耗大量能源，根据工信部数据，2022 年我国基础设施算力规模达到 180EFlops（每秒百亿亿次浮点运算次数），数据中心耗电量达到 2700 亿千瓦时。预计到 2025 年，我国算力规模将超过 300EFlops，智能算力占比达到 35%，数据中心耗电量达到 3500 亿千瓦时。根据《绿色算力白皮书（2023）》预测，到 2030 年我国数据中心耗电量将达到 5900 亿千瓦时。

算力的大规模部署和应用不仅消耗大量能源，同时也带来碳排放问题。以数据中心碳排放为例，数据中心碳排放主要来源于 IT 设备、空调系统、电源系统、照明系统等电力消费产生的间接排放，根据生态环境部环境规划院发布的《中国区域电网二氧化碳排放因子研究（2023）》，目前我国各省平均电网排放因子约 0.61 千克/千瓦时，若 2025 年、2030 年各省平均电网排放因子保持目前的水平不变，则 2025 年、2030 年我国数据中心间接碳排放量将分别达到 2.1 亿吨、3.5 亿吨。随着新型电力系统建设加快，新能源大规模开发，电源结构持续优化，绿色电力占比不断提高，各省平均电网排放因子将稳步下降，带动数据中心间接碳排放减少，预计 2025 年、2030 年减排潜

力分别约为 0.3 亿吨、0.8 亿吨，推动算力产业绿色可持续发展。

在此背景下，比特（通信网络）与瓦特（能源）之间的融合成为了关键议题，这种融合不仅关乎技术的先进性，更涉及能源利用的效率和环境的可持续性。比特与瓦特的融合，要求我们在追求计算能力、网络能力提升的同时，注重能耗的管理和优化。这不仅有助于实现可持续发展目标，也能够在全球能源紧张的背景下，为算力网络产业的长期发展提供坚实的保障，实现算力、网络与能效的最佳平衡，推动绿色算力网络的高质量发展。

1.3.4 用户需求分析

算网能一体化平台的用户包括资源供应方和资源需求方。资源供应方包括算力供应方、网络供应方和能源供应方，而资源需求方则需要高效、经济和安全的计算资源。

首先，算力供应方的核心需求是利用可再生能源，如太阳能、风能和水能，以减少碳排放和对不可再生能源的依赖。他们可能需要与可再生能源供应商合作，并购买可再生能源证书。算力供应方还需要重新思考数据中心的设计，以确保其可持续性，包括采用模块化设计，以支持逐步扩展和优化，选择地理位置便于使用可再生能源，以及使用高效的设备和基础设施。此外，为确保服务的连续性，算力供应商需要制定灾难恢复和备份计划，以应对潜在的能源供应中断或其他问题，减少业务中断的风险。

其次，网络供应方需要优化其基础设施以降低能源消耗。这包括

采用更高效的网络设备、智能网络管理技术和高带宽光纤。网络供应方还需不断升级数据传输技术，提高传输效率，减少能耗，并与数据中心合作，确保绿色数据中心和网络互联的实现。同时，维护网络安全以防范能源供应链的网络攻击也是其重要任务。

能源供应方则需实时监测电力生产过程，确保高效能源转化和最低资源浪费。他们需进行负荷预测和运营成本优化，管理可再生能源，确保稳定的电力供应。通过智能资源分配，能源供应方可以在电网供电充足时将更多计算任务分配给数据中心，提高资源利用率，在电网供电不足时减少能源消耗。

资源需求方需要高效的计算资源，包括强大的处理能力和灵活应对不同计算负载的能力。他们希望获得可扩展、高性能的计算资源以满足不断增长的数据处理需求，同时控制成本，实现经济效益。此外，数据安全和隐私保护也是需求方的重要关注点，他们需要计算资源提供高水平的安全性和隐私保护。由于业务需求的不确定性，资源需求方还需要高度的可伸缩性，能够根据业务波动灵活调整计算资源的规模。

1.3.5 功能需求分析

算网能一体化平台应具备实现和验证新型体系结构、新理论、新方法、新技术和新应用的能力。

从资源供应方的角度来看，平台需要提供广泛的交易市场，通过智能合约技术实现算力资源的共享和支付自动化，确保供应方获得应

有的报酬。平台应帮助供应方更有效地管理数据中心资源，降低维护和运营成本，提高资源利用率，并提供稳定收入。此外，平台需具备强大的资源匹配算法，实现高效的资源分配和公平交易，并提供全面的资源监控功能和智能化运维工具，确保网络稳定性和可靠性。能源供应方需要平台提供实时监测和数据分析功能，以提高电力生产效率和可持续性。

从资源需求方的角度来看，平台应提供灵活的定价策略，动态调整价格，降低使用成本，并提供多样化的合约模式，包括按需付费和长期合作模式，以满足不同合作需求。平台还需提供清洁、可再生能源选项，支持环保和可持续发展。资源需求方期望获得高性能计算资源和高速稳定的网络传输能力，以确保计算任务高效执行和数据快速传递。平台还应提供完善的数据安全措施，如数据加密和身份认证，保障用户数据隐私和安全。同时，平台应能灵活扩展或缩减资源，以适应业务变化，确保资源最佳匹配，并提供多种类型的资源选择，满足需求方的多样化需求。

综上所述，算网能一体化平台应满足资源供应方和需求方的多方面需求，确保资源最佳利用率，降低使用成本，提高网络稳定性和可靠性，支持环保和可持续发展，并提供高性能计算资源、稳定的网络传输能力和完善的数据安全措施。

1.4 算网能一体化发展目标

算网能一体化发展目标旨在使计算、网络和能源资源领域实现深度融合，构建一个安全、高效、可适应的整合环境。这项任务不仅仅是技术层面的整合和提升，更是涉及战略、生态、社会各个方面的系统工程。通过多方协作和创新，算网能一体化能够推动各领域的协同发展，形成一个相互支持、共同进步的生态系统。

首先，算网能一体化的首要目标之一是构建安全可靠的系统架构和技术方案。在当前数字化时代，网络安全问题日益突出，各类安全威胁和风险不断涌现。因此，算网能一体化需要致力于研发先进的安全技术，建立完善的安全管理体系，确保系统运行的安全性和可靠性。这包括数据加密、身份认证、访问控制等方面的技术手段，以防范网络攻击、数据泄露等安全威胁，保护用户隐私和数据安全。通过这些关键领域的投入和研究，能够为算网能一体化的稳定运行奠定坚实的基础。此外，安全架构还需要具备应对突发事件的能力，通过灾难恢复和应急响应机制，确保系统在各种极端情况下依然能够稳定运行。

其次，整合计算、网络和能源资源可以提高资源利用效率和能源利用效率。通过优化系统设计和运行方式，减少能源消耗，实现节能减排和可持续发展。例如，采用智能化调度技术，根据实时负载情况调整资源分配，提高能源利用率；利用能源管理系统监控和优化能源消耗，实现节能减排目标。这种高效能源利用方式既有利于降低运营成本，又有助于减少环境污染，实现经济效益和环境可持续性的双赢。

局面。此外，通过对计算资源的优化管理，还可以减少资源的闲置和浪费，提高系统的整体性能和响应速度。结合绿色能源技术，如太阳能、风能等，进一步提升系统的环保水平，实现真正的绿色计算和绿色网络。

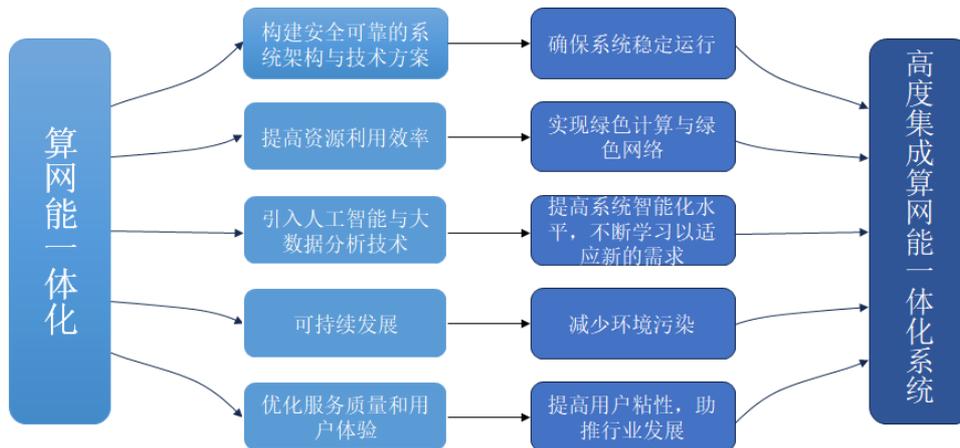


图 1-1 算网能一体化发展目标图

智能化是算网能一体化的重要特征之一。通过引入人工智能、大数据分析等技术，实现系统的自动化运行、智能调度和自适应优化。例如，利用机器学习算法分析网络流量模式，实现智能负载均衡；通过预测性维护技术，提前发现和解决系统故障，提高系统的稳定性和可靠性。智能化技术的应用不仅提升了系统的智能化水平，也增强了系统对不确定性和变化的适应能力，为用户提供更加智能化、个性化的服务体验。同时，这种智能化的应用还能够显著提升系统的效率和管理水平，减少人为干预所带来的误差和风险。通过不断迭代和优化智能算法，系统能够不断学习和适应新的需求和环境变化，保持长期的竞争优势。

算网能一体化还应注重可持续发展。在资源有限、环境压力增大

的背景下，如何实现经济发展与环境保护的良性循环成为重要课题。通过采用清洁能源、优化能源利用结构等措施，降低碳排放和资源消耗，推动能源消费方式的转型，实现可持续发展目标。同时，算网能一体化还可以促进信息化和数字化转型，推动经济结构的升级和创新，为可持续发展提供新动力。例如，通过区块链技术实现能源交易的透明化和高效化，利用物联网技术实现能源设备的智能管理和监控等。可持续发展的理念还应贯穿于整个系统的设计、建设和运营过程中，从源头上减少资源浪费和环境污染，推动绿色经济和循环经济的发展。

最终，算网能一体化的发展旨在优化服务质量和用户体验。通过构建稳定可靠的服务环境，满足用户多样化的需求和场景应用，提高服务的响应速度和可用性，增强用户的满意度和粘性。这不仅有利于企业提升竞争力，也有助于推动数字经济的发展，促进产业升级和转型。在这个过程中，用户需求的精细化和个性化将成为推动算网能一体化技术发展的重要动力。例如，通过大数据分析用户行为和需求，提供定制化的解决方案和服务；通过虚拟现实和增强现实技术，提升用户的交互体验等。与此同时，用户反馈和需求分析将不断反作用于系统的优化和改进，形成一个良性循环，不断提升整体服务水平和用户体验。

综上所述，算网能一体化的发展是一项复杂而全面的工程，需要政府、企业、学术界等多方共同努力，形成合力推动。在安全、高效、智能、可持续的基础上，算网能一体化能够实现其最终目标，为社会

经济发展和人民生活改善作出更大贡献。通过构建一个高度集成和优化的系统，算网能一体化不仅能够提升现有资源的利用效率和管理水平，还能够为未来的发展提供更加坚实的技术和管理基础。各方的协同合作和持续创新，将为实现这一目标提供不竭动力，使算网能一体化成为推动社会进步的重要引擎。

二、 算网能一体化架构

算网能一体化架构基于分层思想设计，包括基础设施层、感知层、模型层、控制层、智脑层、应用服务层、数据层和安全层，助力计算资源、网络资源和能源的灵活调度与共享互联，实现数字化、智能化和绿色化。如图 2-1 所示，本章将给出算网能一体化架构的详细设计描述。

（1）基础设施层

基础设施层包括算力基础设施、网络基础设施和能源基础设施，用于建立稳定、高效、安全和适应性强的计算环境；支持多样化任务，确保网络可靠性、安全性和效率；确保能源操作可靠、高效和安全以满足需求。

（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，对基础设施层资源进行感知，以更有效地管理和优化资源使用，使整个系统更智能、灵活，实时调整资源配置，提高系统性能和效率，满足多样化任务的需求。

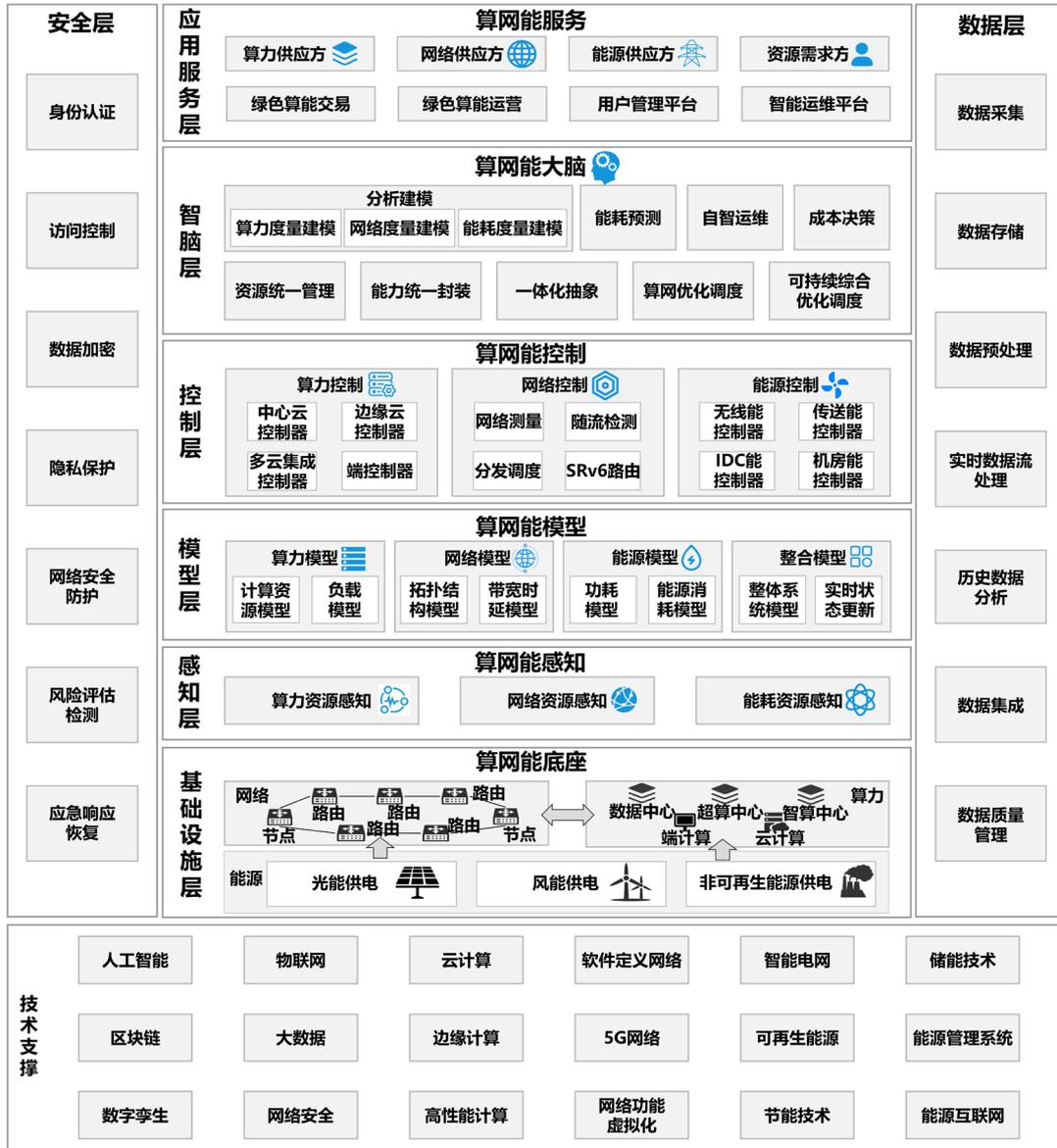


图 2-1 算网能一体化架构图

(3) 模型层

模型层将物理基础设施映射到数字世界，包括算力、网络和能源的建模和分析。算力模型、网络模型、能源模型和整合模型为该层的主要组成部分，其中算力模型包括计算资源模型和负载模型，网络模型涵盖拓扑结构模型和带宽时延模型，能源模型包括功耗模型和能源消耗模型，整合模型分为整体系统模型和实时状态更新。模型层为综

合优化和管理算力、网络和能源提供全面的数字化表示和分析。

(4) 控制层

控制层包括算力控制、网络控制和能源控制。在算力控制方面，有四种控制器，分别是中心云控制器、边缘云控制器、多云集成控制器和端控制器。在网络控制方面，主要包括网络测量、随流检测、分发调度和基于 IPv6 的段路由（Segment Routing over IPv6, SRv6）等。能源控制包括无线能控制器、传送能控制器、互联网数据中心（Internet Data Center, IDC）能控制器和机房能控制器等。这些组件负责不同领域的资源控制和管理任务，并确保整个系统稳定、高效和可靠地运行。

(5) 智脑层

智脑层包含分析建模、能耗预测、自智运维、成本决策、资源统一管理、能力统一封装、一体化抽象、算网优化调度和可持续综合优化调度等功能模块。智脑层通过智能决策和资源优化，实现系统的高效运行和可持续发展。其具体目标包括：深度分析系统资源，预测能源需求；实现系统的自动化维护和故障处理；进行成本效益分析和集中管理资源；提升系统的灵活性、扩展性、稳定性以及整体性能与能效。

(6) 应用服务层

应用服务层包括绿色算能交易、绿色算能运营、用户管理平台、智能运维平台等服务，提供工具和技术来管理和优化业务运营，支持

基于信息的决策，提高效率、降低成本，并确保所需的服务质量；包括算力、网络和能源供应方以及资源需求方等角色，负责提供资源和获取所需的资源。

(7) 数据层

数据层包括数据采集、数据存储、数据预处理、实时数据流处理、历史数据分析、数据集成和数据质量管理等功能，负责从多源数据中采集信息，存储并预处理，支持实时数据流处理和历史数据分析，提升数据一致性和完整性，为智能决策和优化提供数据基础。

(8) 安全层

安全层涵盖了身份认证、访问控制、数据加密、隐私保护、网络安全防护、风险评估检测和应急响应恢复。这些组件协同工作构筑全面而有力的安全防线，保护系统免受各类威胁和风险。

三、算网能一体化关键技术

算网能一体化通过综合考虑算、网、能三维度资源的联合优化实现高效可信可持续的绿色计算。首先需要设计资源感知和任务度量机制，在此基础上，进一步围绕调度、交易、安全保障和自智等方面等开展深入研究。本章将针对算网能资源感知模型、算网能资源度量模型、算网能一体化调度机制、算网能一体化交易机制、算网能一体化安全保障机制和算网能一体化自智技术六个关键技术进行介绍。

3.1 算网能资源感知模型

算网能资源感知是算网能调度的重要基础技术之一，传统算网资源感知机制存在感知标准不统一、性能割裂、速度差异、感知精度低等问题，且无法为能源感知提供解决方案。因此，如何构建面向时域自适应的算网能资源感知机制以扩展一体化感知维度，提升感知精度，优化传统算网感知策略，为构建绿色算力服务奠定基础，成为了算网能协同研究亟待解决的问题。

为实现算网能资源的协同感知，可从算力资源、网络资源、能耗资源进行资源实时监测，从而构建协调统一的资源一体化感知技术。

算力资源监测系统采用了智能型平台管理接口（Intelligent Platform Management Interface, IPMI）和 Prometheus 等先进监控系统，以实现对接力硬件设施和操作系统指标的全面信息采集。其次，

算力资源监测系统还通过与公有云运营商的资源监控应用程序编程接口（Application Programming Interface, API）进行对接，实现对云端计算资源的监控。

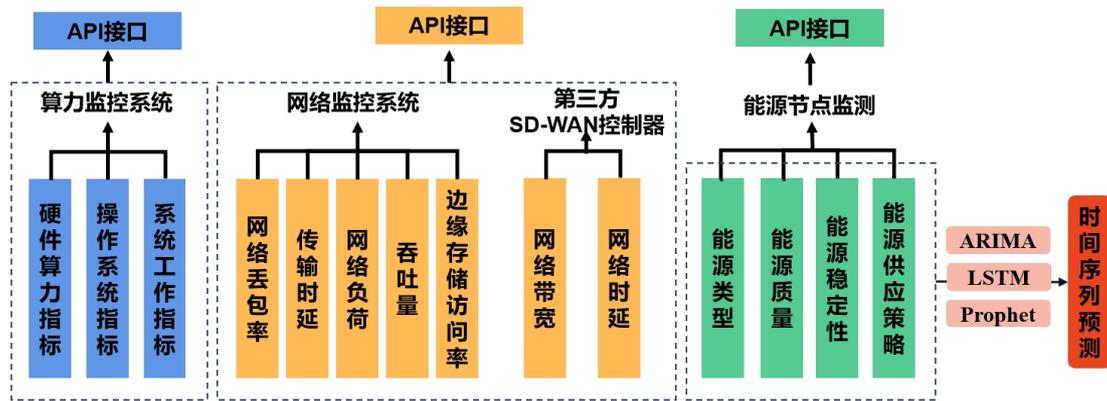


图 3-1 算网能资源感知模型

网络资源感知通过信道监测手段利用信道监测手段和 API 接口与网络控制器进行连接，网络资源感知能够详尽地探测网络中的各项指标，包括但不限于丢包率、延迟、成本、负载、吞吐量、数据库调用率以及边缘存储访问速率。

能耗感知方面，面向能源感知流程，能源监测系统在源头上针对能源供应企业的绿电供应与非绿电供应进行感知，包括监测能源节点的能源产出情况，区分可再生能源（绿电）和非可再生能源。资源感知也涉及对能源的质量、稳定性等方面的实时监测，同时感知能源供应节点在供应策略，供应质量上的数据波动，通过整合智能预测和自适应控制算法，优化算力网络对能源的利用。

3.2 算网能资源度量模型

用户需求作为算网能一体化服务平台的重要输入，首先经过任务度量平台对用户的算网能需求进行解读，才能给用户具有针对性与专业性的算网服务。然而随着算力网络任务的复杂性不断提升，算网设施异构性不断增强，数据中心能耗不断增加，提供具有普适性的精确度量方案变得愈发困难。

为了实现针对算力需求、网络需求与能耗需求的精准度量，可以从算网任务的角度入手，分析不同类型不同场景下的算网任务需求特征，采用构建具有普适性模型的方法构建算网能资源度量模型。

考虑通过构建度量算法的方式实现针对算网任务需求的准确度量。从算法构建的角度入手，我们考虑构建双层度量算法，采用神经网络与 LightGBM 算法结合的方式拟合分析海量算力业务与服务场景数据构建任务服务模型，针对不同场景不同特征输出对应的资源消耗情况，基于算网能度量数据集，划分任务类型、任务场景以及服务等级。以浮点数据的形式记录的任务负载、算力资源、网络资源以及能耗资源，是主要的拟合分析数据，将这些任务输入模型进行学习训练，实现具有普适性的准确度量。

结合算网任务资源需求的层次结构，提出面向任务的算网能资源度量模型架构。该架构主要包括两个分层映射模型：任务类型-算网资源分层映射模型，以及算网资源-能耗资源分层映射模型。度量模型接收到输入的用户需求、服务类型、服务场景以及任务负载数据后，

会分阶段完成对该算力任务的算网能资源度量工作，并将度量结果反馈至算网能资源调度平台和电力中心。

为了增加模型的普适性，针对不同类型，不同场景的算力服务，场景分析模块都会指向该场景下最具有典型性与准确性的算力特征指标。度量得到的能耗资源作为数据中心向电力中心购买能源服务的参考依据，模型会对未来的服务业务进行能耗预测，提前进行储能布局。度量得到的算网能资源将输入算网能一体化资源调度模型中，为算力路由以及算网能资源调度提供重要的数据基础。

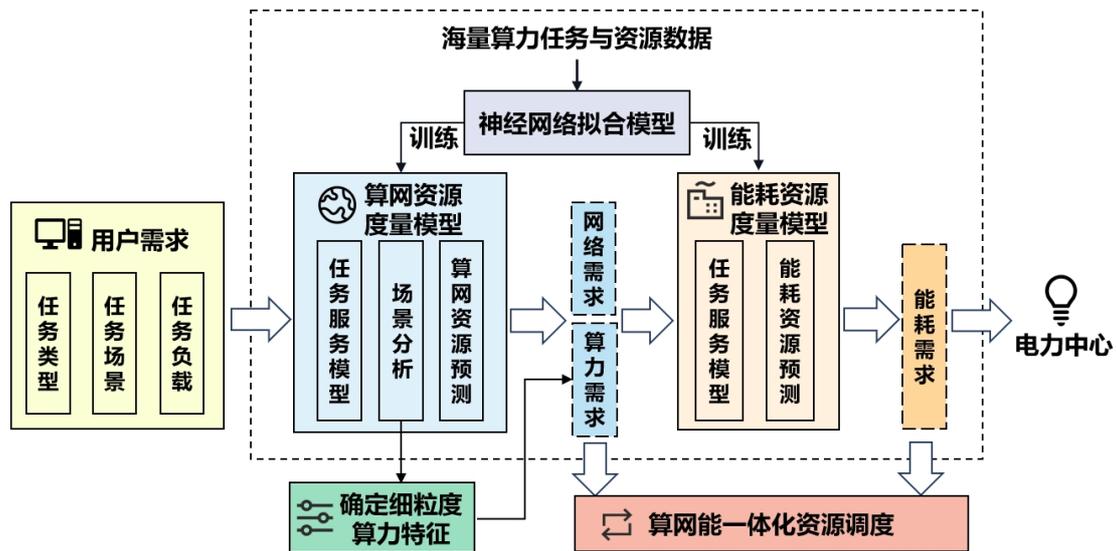


图 3-2 算网能综合度量架构图

为形成一种具有普适性的算网资源度量方案，在多层映射度量过程中，度量模型借助神经网络拟合模型构建基于神经网络的时间序列拟合预测算法，通过训练服务器捕获的海量数据构建拟合模型，分别为两次映射进行模型训练，以预测该任务未来周期下算网节点的可用算力资源、网络资源以及能耗资源，将度量工作实际落地，构建精确的算网能资源度量模型，保持度量过程中的细粒度工作特性，提高度

量模型对于不同服务类型的针对性与普适性。

3.3 算网能一体化调度机制

研究算网能一体化将面临包括复杂的能源供需动态，算力网络的能源消耗高度动态，等在内的一系列巨大挑战，这增加了能源调度的复杂性。其次在能源成本管理方面，算力网络的运行成本主要集中在能源消耗上，如何有效管理能源成本、降低运行成本是关键问题。再者也需克服技术与经济优化，需要平衡技术优化（如算力网络的稳定性和效率）与经济优化（如最小化能源成本和最大化收益）之间的矛盾。算网能一体化调度机制的研究，首先针对算网能协同体系由于交互繁杂、主体多导致调度流程复杂的问题，对算网能调度进行统一建模，在系统模型的基础上，为应对用户多样化的服务质量（Quality of Service, QoS）需求，克服资源的时空不确定性，需研究融合时空特性的综合优化调度机制以实现绿色计算；最后，为应对复杂系统管理的难题，研究面向算网能波动特征的弹性资源扩缩容策略以赋予算网能协同系统自适应能力。

算网能一体化调度系统如图 3-3 所示，主要由六个部分组成，即用户、算力供应方、网络供应方、算网调度平台、能源交易平台和能源供应方组成。

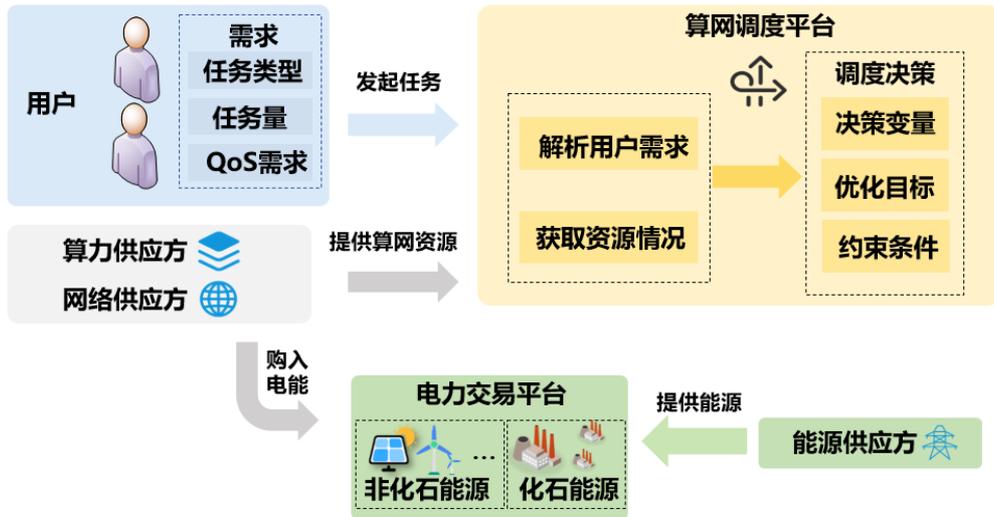


图 3-3 算网能一体化系统资源调度示意图

用户通过购买算力服务和网络服务来完成各自的任务，这些任务可能对时延、网络可靠性等 QoS 需求有不同的要求。算力供应方是指为系统提供算力服务的各方，它们通过在能源交易平台购入不同比例的电能，包括清洁能源如光电、风电等和非可再生能源如火电等，以构建自身的能源比例。这种绿色能源比例直接关系到系统的可持续性和环保性。网络供应方是指为系统提供网络服务的各方，它们同样通过能源交易平台购买电能，以确保网络的高效运行和可靠性。网络服务的质量对用户体验至关重要，特别是在对时延和网络可靠性有严格要求的任务中。能源交易平台充当算网供应方和能源供应方之间的桥梁，为算力供应方和网络供应方提供各种电能选择，包括光电、风电等清洁能源以及火力发电能源。通过能源交易，系统能够实现绿色能源的优化利用，同时降低对传统能源的依赖，推动可持续发展。算网调度平台是系统的大脑，通过分析用户需求和当前资源情况，进行智能资源调度，以高效完成任务。这不仅能提升系统的整体

性能，还有助于实现绿色计算的目标，使系统更加节能环保。

3.4 算网能一体化交易机制

由于算力网络目前正处于扩张和参与者增长的初期阶段，多方算力交易技术已成为推动算力网络发展的关键。算网资源异构化与能网资源时空随机性特征严重影响算网能网络进行多方多级资源交易的效率，进而导致了算网能参与方意愿度较低，绿色计算难以持续的问题。

在算力网络交易过程中，算力与能源交易平台需根据供应方的资源模型和需求，接受算力供应方的资源。平台则需制定符合资源特点的合约奖励机制，以促进供应方的参与。实现算力供应方、用户和能源供应方之间的可信交易激励。

在算力网络资源商品定价上，交易平台会考虑资源商品在资源质量、服务系数和能源类型上对资源价格的影响，确定资源商品的基础价格。业务负载则会影响资源的动态定价。通过综合考虑这些因素，以更准确地描述价格规律。

为有效地设计算力中心与能源中心的激励交易机制，实现绿色高效交易目标，可通过结合博弈论和纳什议价理论，进一步优化交易机制。考虑到能源生产者、消费者和中介之间的利益关系，基于纳什议价理论，设计能源交易的激励机制，使多微网之间在交易中进行合作和协商。

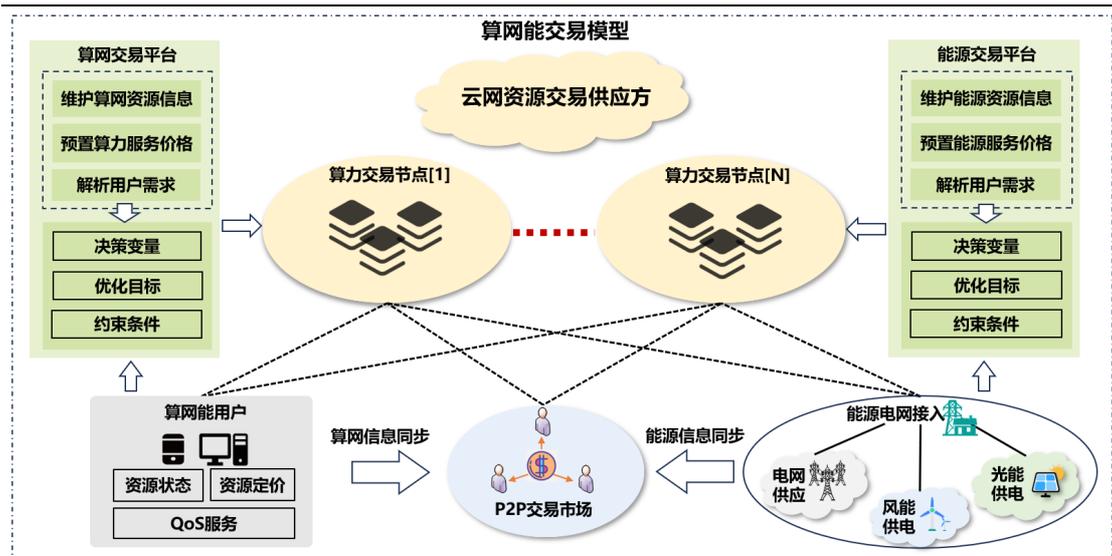


图 3-4 算网能交易模型

3.5 算网能一体化安全保障机制

当前，算网能一体化安全保障机制面临多重挑战。首先是复杂多样的安全威胁，从传统的网络攻击到新兴的人工智能和物联网安全漏洞，安全挑战持续增加。其次是数据隐私和个人信息保护问题，如何在数据安全与用户隐私之间取得平衡仍是亟待解决的难题。此外，缺乏统一的技术标准和规范，限制了算网安全保障机制的发展。

算网能一体化安全保障机制是一种综合性的解决方案，旨在确保算力网络、信息网络和能源网络在整合运作时的安全性、可靠性与可持续发展。该机制可通过集成先进的加密技术、访问控制、身份验证、数据保护措施和能耗监控，为算力网络的每个环节提供端到端的安全保护。算网能一体化交易保障合同是交易双方在能源交易过程中签订的相关协议，确保各方权利和义务明确，交易过程合法合规。算网能一体化交易保障合同规定了能源供应的稳定性和可靠性，包括可能的

应急预案，并且详细规定双方在违约情况下的责任和赔偿措施以及确保交易中的商业信息和数据的保密性等内容。

在实际部署中，算网能一体化安全保障机制需要与现有的网络基础设施、业务流程和能源供给结构紧密结合，以实现无缝的安全集成。

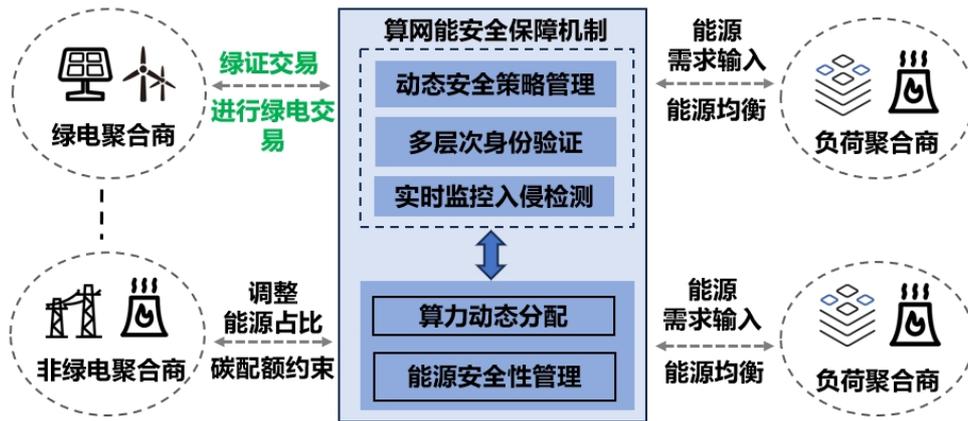


图 3-5 算网能安全保障模型

3.6 算网能一体化自智技术

算网自智模块负责支撑网络中的智能功能，一方面智能使能网络对资源协同编排与调度、确定性管控与路由、智能互联与可信共享等过程中涉及的网络人工智能方法提供统一的框架和平台支持，对算力节点上的网络人工智能模型进行统一记录和管理，增强智能共享的兼容性，实现网络的 AI 原生、智能内生；另一方面网络使能智能支撑和维护算力节点之间构建的可信交易机制，包括部署区块链共享交易系统、数据加密解密、节点及用户认证等功能。

算网能一体化自智技术融合了算法、网络和人工智能的核心理念，旨在实现算力网络的智能化管理和优化。技术层面上的挑战是

算网能一体化自智技术面临的核心问题之一。这种技术需要集成大数据分析、机器学习、自然语言处理等多种先进技术，以实现复杂信息的理解和决策能力。同时，算网能力的发展还需要解决计算效率、算法优化、模型训练和部署等多方面的技术难题，以确保系统的稳定性和性能。此外，安全性是算网能一体化自智技术亟待解决的另一个关键问题。算网能一体化自智技术首先通过网络设备和传感器采集算网状态、能源流状态、流量数据、用户行为等信息。这些数据包括但不限于任务数据、网络流量、设备负载、能源消耗、用户访问行为等，通过大数据分析技术进行实时处理和分析，从而获得对算力网络运行状态的全面了解，必须采取严格的安全措施来保护数据的隐私和完整性，防范黑客攻击和数据泄露的风险。

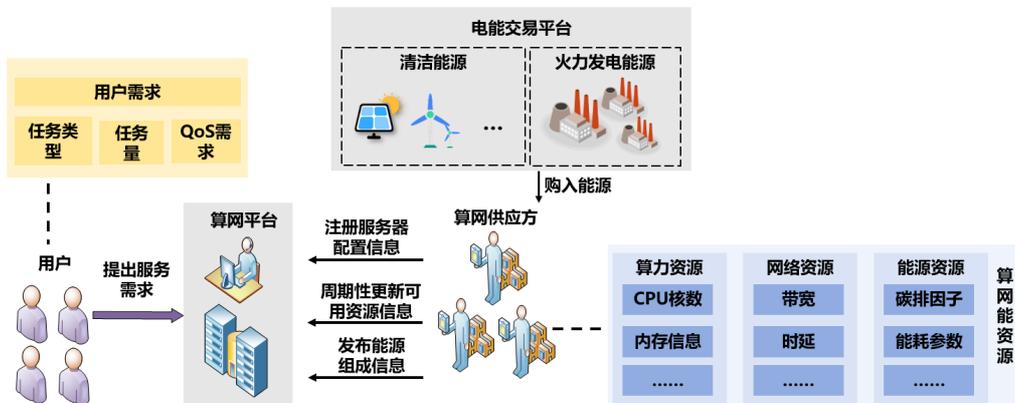


图 3-6 算网能一体化自智平台示意图

研究算网能一体化自智技术首先要针对研究内容和目标构建智驱算网能一体化融合网络试验系统，在此过程中将利用智能模型对网络中的节点资源进行编排和调度，并对网内的路由进行策略上的优化，实现网络内的高精度、高性能路由与管控机制，并能够在网

内根据相应的机制完成智能资源的分享，提高网内整体的性能。在成功完成了域内的设计实现和性能验证之后，再进一步地尝试将网内的各项功能拓展到跨域的实现，完成不同域节点之间资源的分享和调度、协同以及编排功能。

四、算网能一体化应用场景

算网能一体化将丰富和拓展算力资源、网络资源以及能源的供给、应用和服务方式，提升服务的灵活性和高效性，有效降低服务的能耗和碳排放，实现高质量发展。算网能一体化聚焦于社会、工业的数字化和绿色化转型，面向生活、应用中的新兴业务，提供新型优质的解决方案，赋能各行各业。本章从社会生活和工业产业中的典型场景为例，简述了算网能一体化的应用价值。但是，算网能一体化还在初步探索阶段，时代也在不断进步，未来将会涌现更多的算网能一体化业务和应用场景，这需要产学研界共同挖掘、深化探索。

4.1 智慧能源管理

在智慧能源管理领域，算力网络的应用正在通过集成大数据分析、人工智能算法和高速网络通信，推动电网运行的智能化和高效化。智慧能源管理旨在通过实时监测、智能调度和预测分析，优化能源资源的分配和利用，以提高能源系统的效率、可靠性和可持续性。

算力网络首先通过高速网络通信和传感器技术，实现对电网各个节点的实时监测。这些传感器能够收集大量实时数据，如电力负荷、能源来源（包括可再生能源和传统能源）、电池储能状态等。这些数据被传输到中心数据分析平台，利用大数据分析技术进行深度挖掘和分析。

在数据分析阶段，人工智能算法发挥关键作用。通过机器学习、深度学习和优化算法，系统能够从历史数据中学习和预测未来的能源需求和供应情况。例如，基于实时算力分析的能源供需情况，智能电网可以自动调整发电策略，包括调整发电量、转向可再生能源的优先使用等，以最大化能源利用效率和减少能源损耗。

智慧能源管理通过智能调度算法，优化电网中能源的分配和输送。这些算法不仅考虑当前的负荷情况和供应能力，还结合长期的能源需求预测和市场变化，以制定最优的发电计划和电力输送路径。例如，在高负荷时段，系统可以优先调动灵活性较高的能源资源，如电池储能系统和分布式能源，以应对突发的需求增加，同时减少对传统能源的依赖。

智慧能源管理通过算力网络的应用，不仅提升了电网的可靠性和经济性，还推动了能源系统向更加可持续的方向发展。未来，随着第五代移动通信技术（Fifth Generation Mobile Communication Technology, 5G）和第六代移动通信技术（Sixth Generation Mobile Communication Technology, 6G）的普及和更高性能计算技术的进步，智慧能源管理将进一步发展，可能涵盖更广泛的领域，如智能家居、电动车充电网络的优化等。

4.2 智能微网

智能微网和算力网络的融合代表了能源管理和数据处理领域的

前沿发展，特别是在智慧社区和工业园区的应用中，这种结合有助于推动能源系统的高效、智能和可持续运行。

智能微网是一个局部的能源系统，旨在提供自给自足的电力解决方案。它通常包括可再生能源发电设备（如太阳能光伏板）、电池储能系统和智能电网技术。智能微网通过集成这些组件，实现对能源的高效管理，包括实时监测、预测分析和优化调度。在需求高峰期期间，智能微网可以调整能源供应策略，确保电力的稳定性，并最大化地利用可再生能源，降低碳排放。

算力网络指的是分布式计算资源的网络，通过将计算能力分散到靠近数据源的节点，实现高效的数据处理和实时响应。这些节点通常部署在边缘位置，能够减少数据传输延迟并提高处理速度。在智能微网中，算力网络能够显著增强数据处理和分析的能力，支持本地化的决策和操作。

智能微网与算力网络的结合具有多方面的优势。智能微网需要处理大量来自不同传感器和设备的数据，包括电力需求、发电量、储能状态等。算力网络的引入，使得这些数据可以在本地快速处理，从而支持实时的能源需求预测和负荷平衡。例如，算力网络能够实时分析天气数据和发电情况，迅速调整电力分配策略，以应对突发的需求变化或可再生能源的波动。

传统的能源管理系统依赖于中心化的数据处理，这可能导致延迟和系统响应滞后。算力网络通过分散计算资源，使得智能微网能够在

发生故障或需求剧增时，快速做出调整，提升系统的可靠性和稳定性。局部计算节点能够在数据中心失效时继续运行，确保系统的持续运作。

智能微网集成了储能系统和智能电网技术，而算力网络则提供了先进的分析工具来优化这些系统的运行。例如，通过实时数据分析，算力网络能够预测电力需求的高峰期，并自动调整储能系统的充放电策略，以达到最佳的能源利用效率。

随着技术的不断进步，智能微网与算力网络的结合将越来越紧密，推动能源系统向更智能、更高效的方向发展。这种融合不仅能够提升智慧社区和工业园区的能源管理水平，还将促进清洁能源的广泛应用和碳排放的显著降低。未来，随着算力网络技术的普及和成本降低，智能微网将更广泛地部署，实现更加可持续和智能的能源系统。

4.3 绿色数据中心运营管理

绿色数据中心在当今信息技术快速发展的背景下，成为了推动可持续发展和减少碳足迹的关键创新之一。"东数西算"工程作为一个典型实例，展示了如何通过结合可再生能源和先进技术，实现数据中心的绿色低碳运营。

"东数西算"工程通过将数据中心布局在可再生能源资源丰富的地区，如风能和太阳能资源充足的地带，有效利用了这些地区的绿色能源优势。这种布局策略不仅有助于降低数据中心的能源运营成本，还显著减少了对传统能源的依赖，从而减少了碳排放和环境影响。

绿色数据中心采用先进的冷却技术，如直接液冷技术（Direct Liquid Cooling）或间接空气冷却技术（Indirect Air Cooling），有效降低了能源消耗和碳排放。这些技术能够在保持服务器运行温度适宜的同时，最大限度地减少冷却所需的能源消耗，提高能源利用效率。

绿色数据中心还依赖于先进的能源管理系统，这些系统能够实时监测和调节数据中心的能源使用。算力网络在此处发挥关键作用，通过动态调整负载和能源分配，确保数据中心在高效利用清洁能源的同时，保持良好的运行效率和性能。例如，在风能或太阳能波动较大的情况下，算力网络能够智能地调整工作负载，优化能源利用，确保不会因为能源供给的波动而影响服务质量。

随着技术的不断进步和可再生能源的成本持续下降，绿色数据中心将会在全球范围内得到更广泛地应用和推广。然而，仍面临一些挑战如技术成本、能源基础设施的支持、数据中心规模扩展时的管理复杂性等。解决这些挑战将需要政策支持、技术创新和行业合作，以推动绿色数据中心的发展，实现全球可持续发展目标。

4.4 智能制造

随着信息技术的高速发展，人工智能等技术在工业制造领域开始广泛应用，传统制造业正逐渐向智能制造转型。将算网能一体化引入智能制造领域，不但可以提高生产效率，还可以降低成本，实现绿色可持续发展。

在产品生产过程中,利用物联网,人工智能,工业互联网等技术,各个设备之间可以实现互联互通,进而实现各个生产环节的协同工作,在智能算法的协同优化调度下,可以实现从零部件采购到产品生产再到销售的全流程自动化管理。同时,借助传感器设备,系统可以实时监控整个生产流程,把控生产质量,确保生产安全。以上技术的实现需要强大的算力作为支撑,通过引入算网能一体化技术,算力可以通过网络智能流转,针对不同的任务类型,系统可以选择将任务上传至不同的边缘计算节点或云计算中心,以满足不同任务对算力,时延,安全等方面的不同需求。经过系统的智能分配,各个任务可以在不浪费算力的情况下得到有效处理,既提高了生产效率,也降低了生产成本。

同时,大量算力的消耗也意味着巨大的能源消耗,算网能一体化技术可以智能采购清洁能源电力,根据任务特点尽可能地减少算力消耗,这不仅可以促进工业生产更加绿色环保,实现可持续发展,也可降低企业的运营成本。综上,将算网能一体化应用到智能制造领域,可以降本增效,实现创新和可持续发展。

4.5 智慧医疗供应链

通过集成算力、网络和能源管理技术,医疗供应链体系能够实现前所未有的透明度和效率,智慧医疗供应链管理正在经历一场深刻的变革。算力支持大数据分析和 AI 预测,网络确保实时数据传输,而

能源管理优化了从疫苗冷藏运输到医疗设备远程监控的每一个环节。例如，智能仓库利用物联网传感器和 AI 算法优化库存，减少能耗，同时确保紧急物资快速调配，响应公共卫生事件。大数据技术通过对海量医疗数据的实时分析，供应链各环节的决策可以更加精准。

AI 技术通过机器学习和深度学习算法，对供应链数据进行预测分析，从而优化库存管理、采购计划和物流路径。另一方面，物联网技术使得医疗设备和物资在供应链中的各个环节实现了互联互通。传感器和 RFID 标签可以实时监控药品、医疗器械等的库存状态、位置和环境条件，确保其在运输和存储过程中的安全和质量。区块链技术在医疗供应链中用于数据的透明和不可篡改性。通过区块链，供应链各环节的数据可以实现共享，确保数据的真实性和可靠性，尤其在药品溯源和防伪方面具有重要作用。结合大数据和 AI 技术，智慧医疗供应链可以实现智能库存管理系统。通过对历史使用数据的分析和预测，系统能够动态调整库存水平，避免储备过度或短缺现象。此外，IoT 设备可以实时监测库存状态，确保数据的及时性和准确性。

最后通过区块链技术，可以实现供应链各环节的数据共享和协同工作。区块链的去中心化特点确保了数据的透明和不可篡改，使得供应链各方可以实时访问共享的数据，从而提高合作效率和信任度。

4.6 智能大模型能算协同

随着机器学习与人工智能的兴起，大模型成为了一项新的科技角

逐赛道。然而训练和部署超大规模语言模型（如 GPT-4）需要大量的计算资源和高效的数据传输，对算力设施与网络设施都有着一定的性能要求。模型训练涉及处理海量的文本数据，进行复杂的数学运算，这对计算能力和存储有极高的要求。部署这些模型进行实时推理和服务也需要高速网络连接，以确保低延迟和高效的响应。

算网能一体化技术能够有效地管理和分配计算资源，实现对大规模模型训练任务的高效调度和执行。通过智能资源管理和优化算法，算网能一体化技术可以使得训练任务更加平稳地运行，提高了整体的训练效率。其次，算网能一体化技术还能够提供全面的监控和分析功能，帮助用户实时了解模型训练的进展情况和资源利用率，从而更好地优化训练策略和资源配置。

另外，在大模型训练场景中还具备高度的灵活性和可扩展性。它能够适应不同规模和复杂度的训练任务，并支持多种计算架构和硬件平台的部署。这种灵活性使得用户能够根据需求对训练环境进行定制化配置，从而更好地满足不同应用场景下的需求。总的来说，算网能一体化技术在大模型训练场景中的应用，能够有效地提升训练效率、降低成本，并为用户提供更加灵活和可靠的训练解决方案。

4.7 自动驾驶能源数据管理

自动驾驶车辆通过 V2V 和 V2I 通信不断产生大量的实时数据，包括车辆位置、路况、电池状态等。这些数据需要及时处理和分析，

以便为车队管理系统提供即时的路线规划和充电计划。算力网络通过边缘计算节点可以实现数据的实时处理，减少传输延迟，并快速生成对应的决策结果。

算网能一体化能够智能地调度每辆车的充电计划，优先选择使用可再生能源充电，如风能或太阳能。通过实时监测能源市场的变化和充电站的状态，系统可以动态调整充电策略，确保在能源供应充足且成本最低的情况下满足车队的能量需求。通过算网能一体化的数据分析和优化，自动驾驶车队能够有效控制碳排放量。选择使用清洁能源进行充电，减少对传统能源的依赖，显著降低整个车队的碳足迹。这不仅符合环保要求，还有助于企业实现可持续发展目标，提升品牌形象和社会责任感。

随着自动驾驶技术的进一步成熟和清洁能源的普及，算网能一体化在自动驾驶车队能源数据管理中的应用将更加普遍和关键。然而，实现这一目标仍面临着技术成本、能源基础设施支持以及数据管理的复杂性等挑战。通过持续的技术创新和跨行业合作，这些挑战将逐步得到解决，推动自动驾驶车队朝着更智能、更高效、更环保的方向发展。

4.8 轨道卫星智能组网

轨道卫星智能组网技术通过先进的计算和通信技术实现卫星之间高效协作和资源优化分配，具有更高的自组织能力和网络管理效率，

也具有更好的资源优化效果和资源分配能力，由于其在算力、网络与能耗资源方面有着显著的需求，故卫星组网也是算网能一体化的一个重要应用场景。

在智能卫星组网场景下，卫星可以根据任务需求和环境变化，自主调整网络结构，优化通信链路和数据传输路径。当某颗卫星发生故障或失效时，其他卫星可以自动重新配置网络，确保整体网络的稳定性和可靠性。并且基于 AI 的路由算法，采用人工智能和机器学习算法，根据实时数据和历史记录优化数据传输路径，提高传输效率和可靠性。在数据传输方面，卫星组网支持多路径数据传输，降低单点故障风险，提升网络容错能力。在任务处理方面，卫星组网能够利用深度学习与神经网络算法，根据任务优先级和资源使用情况动态分配计算资源和通信带宽，最大化资源利用率，并且卫星组网能够融入分布式计算架构，通过多个卫星协同工作，分担复杂计算任务，提高计算效率和处理能力。也可以部署边缘计算式卫星网络，在卫星上进行初步数据处理和分析，减少数据传输量，降低服务延迟，将来自不同传感器和卫星的数据进行融合处理，提高数据的精度和可靠性。并最终通过部署大量低轨卫星的方式，形成覆盖全球的卫星网络，实现低延迟、高带宽的通信服务，通过智能化管理和调度低轨卫星星座，优化卫星的轨道和姿态，提升网络性能。

在网络能耗与计算能耗方面，卫星组网通过优化计算和通信任务的调度，结合太阳能发电等绿色能源技术，降低卫星的能耗与碳排放，

延长卫星的使用寿命。同时利用高级数据分析和机器学习技术，对卫星数据进行实时处理和分析，提供及时的绿色节能决策支持。

4.9 战术网络

战术网络是一种用于军事和应急响应等高动态、高压环境中的通信网络。这种网络设计的目标是为现代战争提供可靠、快速、灵活的通信能力，以支持战场上的指挥、控制、通信、计算、情报、监视和侦察等各种任务。因此其在可靠性与传输速率、传输时延与服务能耗等方面都具有一定的要求，是十分具有实践意义的算网能一体化应用场景。

战术网络需要提供低延迟的通信能力，以确保战场信息的及时传递，支持实时决策和指挥，并且在战斗或紧急情况下，战术通信网络必须具备很高的可靠性和安全性，能够在恶劣环境下保持稳定运行。同时战术网络为了配合战时复杂多变的战场情况通常具有灵活的自组织网络，能够在无中心控制的情况下动态调整和维护网络连接，支持快速移动的部队、车辆和设备的通信需求，能够适应战场环境的快速变化。另一方面，结合无线电、卫星通信、微波通信等多种方式的多层次通信能力，战术网络能够在各种环境下实现有效通信，并且在战术边缘网络、战术中继网络和战略网络等多个层次的网络协作之下，战术网络能够为军队提供全方位的通信支持。

为了保证通信安全，战术网络结合网内部署的算力设施，采用智

能强加密技术保护通信内容，能够防止信息泄露和被窃听，也能够增强抗干扰能力，能够在电子战环境下保持通信畅通。同时，战术网络能够自动检测并修复故障，以确保通信的连续性，并通过冗余路径和设备设计，增加网络的容错能力，防止单点故障导致通信中断。另一方面，战术网络利用人工智能和机器学习技术优化路由选择，提高网络的传输效率、能源利用效率和网络可靠性。因此为了保证战时网络的安全性和稳定性，网络中的算力供给变得十分重要。

战术网络融入算网能一体化技术可以进行自动配置和管理功能，以此减少人为干预，提高网络部署和维护的效率。并且结合战术网络中部署的各类传感器、平台和系统之间的信息共享，能够提高态势感知和决策支持能力，优化战时网络路由转发决策，减少网络不必要的能耗开支，推动节能转发决策，降低网络工作能源消耗以适应复杂的战场环境。

战术网络在现代军事行动中扮演着关键角色。通过提供高效、可靠、安全的通信能力，战术网络为部队在动态和高风险环境中保持战斗力和决策优势提供了坚实保障，也是算网能一体化的重要应用场景。

五、算网能一体化发展建议

5.1 发展阶段划分

目前算网能一体化的发展仍处在探索阶段，无论是学术界还是产业界都在持续推进理论创新与工程实践。算网能一体化发展涉及多方协同，不同领域之间需要打通技术壁垒，进行标准的升级互通与人才的交流协作，方案设计与技术落地都存在很多挑战。因此，算网能一体化的发展应采取统筹规划、循序渐进的方式，按照以下四个阶段进行推进落地。

5.1.1 起步阶段

在这个阶段，主要工作是基于传统的算力网络和能源系统构建起基础的信息化设施，例如能源监控系统、远程控制系统、资源感知系统等，搭建底层资源感知网络硬件，分别构建底层智能资源感知体系，提高能源系统的运行效率和管理水平，为资源的统一调度搭建底层设施。

5.1.2 整合阶段

在这个阶段，开始将已搭建好的算力网络技术体系与智能能源系统进行信息交互与功能整合，实现算网能一体化服务平台对各个环节之间的数据感知和互联互通，收集算网能任务数据体系，设计算网能

一体化资源调度模型，实现一体化调度管控，构建起较为完善的算网能资源管理平台，完成对算力、网络以及能源系统的综合监测、智能调度和服务效率优化。

5.1.3 智能化阶段

在这个阶段，通过引入人工智能、大数据、物联网等先进技术，实现能源系统的智能化管理和决策支持，构建综合任务度量机制，设计面向任务的算网能一体化度量模型，准确解读用户需求，提升平台服务的准确性与灵活性，同时赋予能源系统自学习、自适应、自优化的能力，能够更加灵活、高效地响应市场需求和能源供需变化。

5.1.4 生态化阶段

在这个阶段，算网能一体化平台不仅仅关注能源系统的高效运行和管理，还将考虑到能源系统与环境、社会的整体融合。通过推动清洁能源、能源互联网等概念的发展，引入碳排放约束，降低数据中心的高额碳排放，构建绿色算力，推动能源网络的多维度调度，实现能源的可持续发展和生态环境的改善。

5.2 发展建议

(1) 研究制定中长期发展规划。结合算网能一体化领域产业链发展情况、技术成熟度、经济可行性等要素，尽快研究制定算网能一

体化中长期发展规划，明确算网能一体化发展方向、目标和路径，推动算网基础设施与能源基础设施协同规划、建设及运行，出台相关指导性意见和政策，引导算网能一体化高质量发展。

（2）研究推动标准体系建设。研究建立涵盖规划设计、装备采购、施工验收、运行检测、回收利用等全生命周期、全产业链的算网能一体化标准体系，加强国际、国家、行业等各层级标准衔接。

（3）集中攻关关键技术。支持龙头骨干企业组建算网能一体化“政产学研用”创新联合体，联合开展关键技术装备研发创新，推动关键技术装备自主可控。集中攻关算网基础设施与能源基础设施协同规划及运行、绿色低碳、负荷预测与柔性调节响应等关键技术，研究构建算网能一体化全生命周期数字孪生模型和数据，研发算网能一体化平台等核心装备平台，支撑全生命周期、全产业链高效协同。

（4）支持工程示范与经验推广。从国家层面加大对算网能一体化示范工程建设的政策支持力度，开展一批企业主导的国家级试点示范，加快积累算网能一体化实践经验，固化优化项目开发流程和商业模式，营造良好的产业发展生态。

六、总结与展望

近年来，随着算力网络和 AI、大数据等业务的飞速发展，算力网络自身的能耗和碳排放激增，为响应国家“双碳”战略，促进产业绿色转型，算力网络亟需以通信网为骨架连接泛在异构的算力节点并通过融合能源特性实现“算力”和“电力”协同优化以及算网能一体化，构建绿色的全国一体化算力网。但是，我们还必须清楚的认识算网能一体化还处于发展的初期，还存在许多问题和挑战亟需解决。例如算网能一体化架构设计、算网能资源感知和多样化任务度量模型、算网能一体化调度和激励机制等。白皮书通过介绍算网能一体化的发展背景、参考架构、关键使能技术、典型应用场景、算网能一体化发展面临的挑战和发展建议，试图为大家详细的描绘算网能一体化在未来发展中的美好愿景。期待在不远的将来，算网能一体化能够进一步赋能各行各业，推动人类向绿色低碳社会迈进。

参考文献

- [1] 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
- [2] 郭亮. 数据中心发展综述[J].信息通信技术与政策, 2023, 49(5): 2-8.
- [3] 朱勇, 罗军舟, 李伟. 一种 workflow 环境下能耗感知的多路径服务组合方法[J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 627-638.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杨丽娜, 赵鹏, 王佩哲. 基于 GRU 神经网络的数据中心能耗预测模型研究[J]. 电力信息与通信技术, 2021.
- [10] 吴美希, 杨晓彤. 算力五力模型: 一种衡量算力的综合方法[J]. 信息通信技术与政策, 2022, 48(3): 13.

- [11] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化 (一): 数据中心能耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 9: 3161-3177.
- [12] 卢洪明, 刘先锋, 周舟, 等. 机器学习方法的云数据中心能耗模型研究[J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(9).
- [13] Gu C, Liu C, Zhang J, et al. Green scheduling for cloud data centers using renewable resources[C]// 2015 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2015: 354-359.
- [14] 温正楠, 刘继春. 风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2449-2459.
- [15] HanLiang X, HongYu P, Sha G, et al. Research on Energy Dispatching Strategy Based on Energy Forecast Algorithm for Data Center[C]// 2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom). IEEE, 2020: 1444-1449.
- [16] 兰洲, 蒋晨威, 谷纪亭, 等. 促进可再生能源发电消纳和碳减排的数据中心优化调度与需求响应策略[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 1.
- [17] 王志杨, 张靖, 何宇, 等. 数据与模型混合驱动的区域综合能源系统双层优化调度决策方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3797-3809.
- [18] 王肇国, 易涵, 张为华. 基于机器学习特性的数据中心能耗优化方法[J]. 软件学报, 2014, 25(7): 1432-1447.
- [19] 马惠荣, 陈旭, 周知, 等. 绿色能源驱动的移动边缘计算动态任务卸载[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(9): 1823-1838.
- [20] 徐小龙, 杨庚, 李玲娟, 等. 面向绿色云计算数据中心的动态

- 数据聚集算法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1923-1929.
- [21] 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. 2019: 67-77.
- [22] 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, (7): 44-47.
- [23] 段晓东, 姚惠娟, 付月霞, 等. 面向算网一体化演进的算力网络技术[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 76-85.
- [24] 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, 49(5): 21.
- [25] 李建飞, 曹畅, 李奥, 等. 算力网络中面向业务体验的算力建模[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(5): 34-38.
- [26] 雷波, 刘增义, 王旭亮, 等. 基于云, 网, 边融合的边缘计算新方案: 算力网络[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 44-51.
- [27] 姚惠娟, 耿亮. 面向计算网络融合的下一代网络架构[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 38-43.
- [28] 雷波, 王江龙, 赵倩颖, 等. 基于计算, 存储, 传送资源融合化的新型网络虚拟化架构[J]. 电信科学, 2020, 36(7): 42-54.
- [29] 庞冉, 易昕昕, 辛亮, 等. 算力网络路由调度技术研究[J]. 电信科学, 2023, 39(8): 149-156.
- [30] Zhu S, Ota K, Dong M. Green AI for IIoT: Energy efficient intelligent edge computing for industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 6(1): 79-88.
- [31] Hou W, Ning Z, Guo L. Green survivable collaborative edge computing in smart cities[J]. IEEE Transactions on Industrial informatics,

2018, 14(4): 1594-1605.

[32] Bebortta S, Senapati D, Panigrahi C R, et al. An adaptive modeling and performance evaluation framework for edge-enabled green IoT systems[J]. IEEE transactions on green communications and networking, 2021, 6(2): 836-844.

[33] 李福昌, 吕婷, 曹亘, 等. 5G-A/6G 绿色低碳技术现状及发展趋势[J]. 信息通信技术, 2023, 17(4): 32-38.

[34] 王继业, 蒲天骄, 仝杰, 等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 1-14.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 曾鸣, 刘英新, 周鹏程, 等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1697-1708.

[38] 石亮缘, 周任军, 李娟, 等. 基于时间序列相似性度量的新能源-负荷特性指标[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 75-81.

[39] 林俊光, 冯彦皓, 林小杰, 等. 综合能源系统源网荷储动态建模技术进展[J]. 热力发电, 2022.

[40] 胡博, 孙铠彬, 邵常政, 等. 面向全过程碳足迹的园区综合能源系统碳感知与优化方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2495-2504.

[41] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683.

[42] 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. 2021 年江西省电机工程学会年会论文

集, 2022.

- [43] Shafiekhani M, Ahmadi A, Homae O, et al. Optimal bidding strategy of a renewable-based virtual power plant including wind and solar units and dispatchable loads[J]. Energy, 2022, 239: 122379.
- [44] 张宁, 朱昊, 杨凌霄, 等. 考虑可再生能源消纳的多能互补虚拟电厂优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 625-633.
- [45] 朱霄珣, 刘占田, 薛劲飞, 等. 计及柔性负荷参与的综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 29-38.
- [46] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 60-68.
- [47] 陈厚合, 王子璇, 张儒峰, 等. 含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2615-2625.

附录 A：术语与缩略语

AI	Artificial Intelligence, 人工智能
AIGC	Artificial Intelligence Generated Content, 生成式人工智能
API	Application Programming Interface, 应用程序编程接口
AR	Augmented Reality, 增强现实
ARIMA	Auto-Regressive Moving Average, 自回归滑动平均
CCEI	Computing-Communication-Energy Integration, 算网能一体化
CPE	Customer Premise Equipment, 用户端设备
CPU	Central Processing Unit, 中央处理器
5G	Fifth Generation Mobile Communication Technology, 第五代移动通信技术
IDC	Internet Data Center, 互联网数据中心
IPMI	Intelligent Platform Management Interface, 智能型平台管理接口
LSTM	Long Short-term memory, 长短时记忆
QoS	Quality of Service, 服务质量
SD-WAN	Software Defined Wide Area Network, 软件定义广域网络
SRv6	Segment Routing over IPv6, 基于 IPv6 的段路由
VR	Virtual Reality, 虚拟现实