DOI 10.15302/J-SSCAE-2025.11.007

新型电力系统背景下供需互动发展与分布式资源聚合技术应用前瞻

羿应棋[1]，池玉泉[1]，张勇军[1*]，王宇洋[1]，左婧[1,2]，覃浩[1,2]

（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 广东电网有限责任公司，广州 510699）

摘要：在新型电力系统建设背景下，充分释放分布式资源的灵活调节潜力是促进新能源消纳，提升系统安全、经济、低碳运行水平的重要途径；分布式资源聚合是海量分散资源参与供需互动的重要组织形式，厘清内在联系与发展路径对于提升新型电力系统供需互动水平和灵活调节能力具有重要意义。本文从互动主体、聚合手段、市场机制等方面辨析了新型供需互动的基本内涵，总结了计划型、市场型、自治型供需互动的阶段特征及新型供需互动的国际研究进展，识别出互动元素多元化、互动行为复杂化、互动技术智能化等新型供需互动的发展特征。进一步阐述了分布式资源聚合的作用，从信息、物理、社会等角度梳理了分布式资源聚合在感知、建模、调控、规划、交易环节面临的挑战。针对分布式资源聚合适应新型供需互动，展望和探讨了车网互动、电 – 氢互动、电 – 碳互动等典型场景，多元小微传感、互动博弈行为建模、数据驱动的智能决策、异构资源双向优化聚合、多市场量化交易等关键技术，基于个体联盟的价值共创、基于区块链的多方可信交易等灵活机制，推动全社会资源优化配置、助力能源系统普惠和安全发展等发展前景。相关内容可为电力系统供需互动的理论研究、机制设计、工程应用提供参考，进而支撑新型电力系统灵活性能力提升。

关键词：电力系统；供需互动；分布式资源聚合；虚拟电厂；电力市场；灰数据

中图分类号：TM73　　**文献标识码：**A

Development of Supply-Demand Interaction and Technical Prospects for Distributed Resource Aggregation in the Context of New Power Systems

Yi Yingqi[1], Chi Yuquan[1], Zhang Yongjun[1*], Wang Yuyang[1], Zuo Jing[1,2], Qin Hao[1,2]

(1. School of Electrical Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510699, China)

Abstract: In the context of new power system development, releasing the flexible regulation potential of distributed resources is crucial for promoting renewable energy consumption and improving the safe, economical, and low-carbon operation of power systems. Distributed resource aggregation is an important organizational form for enabling numerous dispersed resources to participate in

收稿日期：2025-11-09；**修回日期：**2025-12-24

通讯作者：*张勇军，华南理工大学电力学院教授，研究方向为智能配电网、配电网优化与规划；E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

资助项目：国家自然科学基金项目(52177085)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

supply-demand interactions of new power systems. Clarifying the intrinsic relationship and coordinated development pathways between the two is significant for enhancing the supply-demand interaction and flexibility capabilities of new power systems. This study summarizes the implications of new supply-demand interactions from the perspectives of interactive entities, aggregation methods, and market mechanisms. It also clarifies the stage characteristics of planned, market-based, and autonomous supply-demand interactions, and reviews international research progress on new supply-demand interactions. Moreover, the study analyzes the characteristics of new supply-demand interactions from three dimensions: interaction elements, interaction behaviors, and interaction technologies. It further analyzes the role of distributed resource aggregation, and summarizes major challenges it faces in perception, modeling, regulation, planning, and trading links from information, physical, and social perspectives. Furthermore, the study reviews the prospective applications of distributed resource aggregation from four aspects: typical scenarios, key technologies, flexible mechanisms, and development prospect. Specifically, the typical scenarios involve vehicle-grid, electricity-hydrogen, and electricity-carbon interactions. The key technologies include diverse small-scale sensing, game-theoretic modeling of interactive behavior, data-driven intelligent decision-making, bidirectional dynamic aggregation for heterogeneous resources, and multi-market quantitative trading. By leveraging the flexible mechanisms of value co-creation through individual alliances and blockchain-based trusted multi-party transaction, the prospects for optimizing resource allocation across society and promoting the inclusive and secure development of energy systems are expected to be realized. These insights can provide references for theoretical studies, mechanism design, and engineering applications of power system supply-demand interactions, thereby supporting the improvement of flexibility in new power systems.

Keywords: power system; supply-demand interaction; distributed resource aggregation; virtual power plant; electricity market; grey data

一、前言

在推动能源消费模式转型和“双碳”行动的背景下，引导绿色能源消费成为加速电力系统脱碳进程的关键举措。随着高比例可再生能源并网、大规模电动汽车负荷的接入，新能源出力的波动性、电动汽车充放电行为的无序性、频发的极端天气事件对电力系统的安全稳定运行构成严峻挑战[1-2]。相应地，电力系统供需关系亟待从传统“源随荷动”的被动跟随转向“源荷互动”的主动响应，以适应新型电力系统对灵活性资源的储备需求[3]。

供需关系的转变也在推动供需互动相关理论技术、工程实践、新兴业态的发展。在理论技术方面，价格型、激励型、混合型等车网互动理论不断丰富，为规模化电动汽车有序充放电并与电网协同运行提供了关键支撑[4]。低压侧市场资源自动汇聚建模技术的提出，为海量低压负荷资源参与电力现货市场化交易提供了方向性参考[5]。区块链技术的发展与应用，为用户侧柔性资源构建了安全和可信的交易环境[6]。在工程实践方面，冀北电网的虚拟电厂接入了蓄热式电采暖、智慧楼宇等11类可调节资源，参与了华北调峰辅助服务市场[7]。在新兴业态方面，国外的负荷聚合商汇集可控负荷资源参与电力现货市场，实施灵活电价以引导用户互动用电[8]。整体来看，以新能源为主体的新型电力系统建设不断推进，系统对灵活性资源的巨大需求推动供需互动发展，在促进理论、实践、业态持续深化的同时，催生更多的新型互动元素、互动行为、互动技术，逐步形成新型供需互动的发展格局。

屋顶光伏、电动汽车、新型储能等分布式资源的规模与种类不断扩展，成为供需互动的重要参与主体。鉴于分布式资源“点多面广”的特点，需要通过聚合方式参与系统调控与市场交易，以提升市场竞争力和互动响应质量。然而，现阶段的分布式资源聚合在感知、建模、调控、规划、交易等方面仍存在诸多技术挑战：用户行为特性感知不准确，数据采集精度不足[9]；“源荷”分布式资源精确化建模复杂度高，聚合调控需考虑多重不确定性因素[10]；分布式资源与聚合商的双向选择与利益分配机制不够完善[11]；用户能量互动潜力未能充分挖掘，市场化交易机制不够灵活[12]；用户侧物联设备增多，而信息交互过程中存在黑客攻击、隐私泄露等风险[13]。

构建分布式资源聚合并参与新型供需互动的研究框架，厘清相应技术的未来发展方向，有助于推动新型供需互动与分布式资源聚合方面的理论研究及技术应用。本文在阐述新型供需互动的内涵与发展现状的基础上，分析电力系统供需互动的发展演变阶段及其特征、新型供需互动模式下分布式资源聚合的关键作用，从感知、建模、调控、规划、交易等方面梳理分布式资源聚合发展面临的挑战，从典型场景、关键技术、灵活机制、发展前景等方面

探讨分布式资源聚合的未来应用，为电力系统供需互动的理论研究、机制设计、工程应用提供参考。

二、新型供需互动的基本情况

（一）新型供需互动的内涵与发展阶段

新型供需互动指以分布式灵活资源作为互动主体，通过“源网荷储”一体化、微电网、虚拟电厂等聚合方式，基于电力现货、辅助服务、碳排放等多元化市场机制，实现电力系统安全、经济、低碳运行的调控、交易和新业态。典型应用场景包括车网互动、多能互补、电碳协同等，依靠海量的分布式资源并通过合理的市场化手段引导，在保持电力系统安全稳定运行的同时进一步优化系统资源配置，改善全社会的整体福利。根据分布式资源参与互动形式及程度的不同，供需互动的发展将经历不同阶段，可划分为计划型、市场型、自治型3个阶段（见表1）。

计划型供需互动阶段，主要依靠以行政措施为主导的需求侧管理，参与主体较为单一，多为用电需求较大的工业用户。缺乏市场化的交易机制，商业模式较少，负荷侧以有序用电的行政措施为主，互动元素主要是电能。电源侧的互动对象以传统火电厂或燃气电厂为主，但发电行为和服务调用均严格遵循电网的行政指令与既定规则，而非基于市场竞价机制。在电力市场建设初期，依靠行政手段、简单的经济补偿来调动少量而大型的负荷资源参与系统平衡，是一种普遍但具有过渡属性的方式。

市场型供需互动阶段，从以单向激励为主转向以市场化交易为主，参与主体包含源、荷、储等多个类型。其中，负荷侧的互动主体可延伸至海量的低压用户[14]，电源侧将新能源机组的上网电量全部纳入市场化交易范畴，储能侧将独立储能、新能源配储、工商业储能、居民储能等纳入广域互动范畴[15]。在商业模式方面，虚拟电厂、微电网等负荷或电源聚合商参与市场化交易将成为主流，通过聚合分布式资源并参与中长期、现货、辅助服务和容量等市场，代理海量分布式资源参与供需互动。在互动元素方面，电–碳市场深度耦合，应用碳流追踪模型刻画碳排放流动，以量化不同能源系统、不同地区的动态碳排放强度；碳市场、电市场之间的价格趋势可能出现相互传导的情况，进而实时影响用户用电和碳排放行为。

自治型供需互动阶段，在以大电网为骨干支撑并促进广域供需平衡的前提下，区域能源系统（如微网、园区）的自治优化能力将显著增强，形成“大网统筹、局部自治”的协同互动格局。具有配售电资格的区域能源运营商将成为参与主体，拥有运营区域内所有能源、碳排放的定价权，通过实时电价和碳价波动来促进区域内清洁能源消纳与用户节能减排。在商业模式方面，受区域能源运营商的主导，分布式能源交易、碳共享、电动汽车车网互动将成为主流，区域内各主体以发/用电权、碳排放权交易的形式开展自主互动，区域外以聚合形式参与外部电能量、碳排放、其他能源等市场。在互动元素方面，除电–碳互动外，电–气、电–氢、电–热等多元素互动形式将成为常态，互动主体也将在不同市场机制下寻求最优的用能行为，促进提升个体、局部、全局的经济与环保效率。

整体来看，计划型供需互动作为传统供需互动模式不再适应当前新型电力系统的运行环境，而市场型、自治型供需互动模式是未来发展方向。我国的供需互动正处于市场型向自治型的转型升级阶段，也随着电力市场改革的进一步深入而呈现加速转型态势。

（二）新型供需互动的国际研究进展

发达国家较早开展了市场化环境下新型供需互

表1　供需互动不同发展阶段特征

发展阶段	时间	参与主体	商业模式	互动要素
计划型	2015年之前	以工业用户为主	较为简单，多为需求侧的单方面响应	电力互动
市场型	2015—2030年	拓展至低压用户、新能源机组、分布式储能等新兴主体	虚拟电厂、微电网等资源聚合商参与市场交易	电力互动、电–碳互动
自治型	2030—2050年	出现具有配售电资质的区域能源运营商	分布式能源交易、碳共享、车网互动	电力互动、电–碳互动、电–气互动、电–氢互动等

动技术的研究与应用，逐步形成了较为成熟的理论体系，也在工程实践、商业模式方面积累了丰富经验，对国内发展具有借鉴价值。

在理论技术研究方面，针对“源网荷储”协同互动需求提出了虚拟能源理论，通过先进的通信与控制架构将海量、分散、异构的分布式资源聚合成稳定可靠的互动单元再参与配电网的可靠性提升[16]。针对综合能源系统互动需求，构建了电、热、冷、气等能源耦合的统一能路模型，揭示了不同能源系统之间时空互补的潜力[17]。也有学者利用电转气（P2G）技术将富余的可再生能源转化为天然气储存，或在用电高峰时将天然气转化成电能，以跨能源品种的灵活性转换显著拓宽供需互动的资源池与调节维度[18]。在电力市场理论研究方向，国外主要关注从单一的能量市场扩展到包含调频、备用、爬坡在内的辅助服务市场和容量市场，将灵活性视为可交易的商品属性[19]。相关理论进展为需求侧资源设定了清晰的价值变现路径，使虚拟电厂或负荷聚合商在参与平衡市场、提供容量保障时能够获得与传统机组相当甚至更优的经济回报，从技术经济层面为供需互动可持续发展创造了基础条件。

在工程实践方面，针对虚拟电厂的实际应用，在云平台上聚合了数量众多的生物质发电、光伏、大型工业负荷，在供需互动过程中解决了异构设备即插即用、海量数据高频采集及处理、资源优化控制等问题[8]。美国伯克利实验室依托开放式自动需求响应通信规范等标准协议，实现电网需求信号与终端智能设备之间“机器对机器”式的自动交互[20]。日本HEMS项目采用边缘计算和云端协同控制算法，在无需人工干预的条件下自动调整家庭设备，实现无感、精准、用户友好的负荷削减[21]。在提升局部电网韧性的供需互动实践方面，一些国家实施了社区能源项目，精准部署分布式光伏、社区电池储能、针对性需求响应，形成了可自我调节的社区级能源互联网[22]。相关工程实践为新型供需互动理论的落地转化提供了直接参考，实践中出现的问题也将深刻影响供需互动的进一步发展。

在商业模式上，国外大型企业构建了基于市场机制、追求多方共赢的价值共享生态。在聚合交易的商业模式中，德国企业聚合发、用、储3类用户参与能源现货市场交易并分享电网平衡服务收益，在分散用户和复杂电力市场之间建立了有机联系。美国特斯拉公司依托Autobidder能源交易软件平台构建了“车+桩+光+储+荷+智”商业模式，聚合了大量电动汽车通过价格预测、车况预测、智能调度等开展车网互动。英国Piclo平台运营商联合配电公司、输电公司、灵活资源提供商形成了商业共建平台并取得良好收益[23]。LO3能源平台应用区块链技术构建了分布式信任机制、点对点能源交易模式，支持社区内的产消者将盈余电能以自定义价格与其他产消者进行交易[24]。整体来看，国外在新型供需互动方面形成了理论、实践、商业模式协同发展格局，但具体成效依赖市场成熟度和标准体系，相关经验需结合国内实际情况进行转化应用。

三、新型供需互动发展特征

（一）互动元素多元化

新型供需互动并不局限于电元素，还包括碳、天然气、氢等元素。根据互动元素的不同大致分为电力互动、电－碳互动、多能互动3种。

1. 电力互动

电力互动是最常见的供需互动方式，包括需求响应、有序用电、车网互动等互动形式；通过“源－网－荷－储”的互动调节（即用户根据电价或激励信号调整用电负荷以达到“削峰填谷”效果），保持系统的电力供需平衡和安全运行。传统的电力互动基本上是单向型互动，即用户通过负荷削减、转移、分散来进行互动响应，涉及对象包括中央空调、冰蓄冷、照明等。随着一次、二次装备和信息通信技术的发展，电力互动模式经历了从传统单向响应向双向协同互动的范式转变（见图1）。其中，车网互动作为新型双向电力互动的典型代表，能够有效缓解电网高峰压力、提升电力系统的应急韧性，相关研究已深入探讨了充电桩检测、运

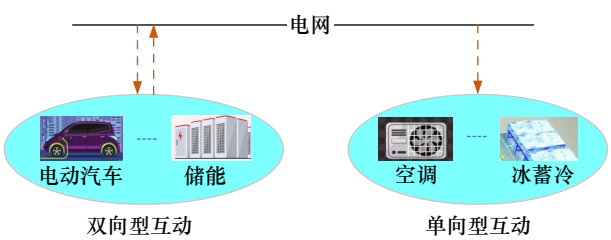


图1　电力互动示意图

营策略、互动激励机制等[25]。

2. 电 – 碳互动

电 – 碳互动指在行业精细化碳核算的背景下，用户主动改变自身的用电行为（发生“碳响应”）进而获取低碳效益的供需互动方式[26]，用于描述需求侧（基于供给侧实时碳排放水平）进行用电行为调整后的降碳过程。电 – 碳互动不仅有利于降低电力系统的整体碳排放水平，而且能够促进清洁能源消纳。对于作为碳排放重要源头的工业园区、商业建筑，未来可基于时变碳排放因子或边际碳排放因子来引导供需的低碳互动，进而促进可再生能源消纳、降低温室气体排放强度。电 – 碳互动的核心因素是碳成本，包括直接附加碳排放成本、碳流追踪确认用户碳排放成本等。实施合理的电 – 碳价格叠加机制（如面向电动汽车集群的电 – 碳协同运营决策策略），能够引导分布式资源个体的发 / 用电行为，进而降低碳排放并提高电力系统供需互动的效果[27-28]。随着《中共中央办公厅 国务院办公厅关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》（2025 年）的实施，未来碳排放管控将逐步由强度控制转向总量控制并形成硬约束机制，将进一步激发需求侧开展电 – 碳互动的潜力。

3. 多能互动

多能互动指需求侧以电为枢纽、以用能经济效率最高为目标进行多能流转换的供需互动方式，主要应用于具有多元化用能需求的园区综合能源系统，以电 – 气互动最为典型，还包括电 – 氢互动、电 – 热互动等形式。电 – 气互动主要发生在电网与天然气网络并存的能源系统中，电 – 气互联系统是电 – 气转换的关键，在促进新能源消纳、提高能源利用率方面发挥了重要作用[29]。电 – 气互联系统涉及 P2G，具体过程包括电解水生成 H_2、催化 H_2 和 CO_2 反应以合成天然气（见图 2）。电能量在电网中近似光速传输，但是气流在天然气网中的传输有时延，因而能量流和物质流的互动涉及复杂的耦合与解耦过程、多能源市场交易机制、泛在物联网技术等[30]。

（二）互动行为复杂化

随着新型电力系统建设的持续推进，电力现货市场、碳交易市场、绿证绿电市场进一步协同发展并促使多类型市场机制深度耦合。这一趋势对供需互动模式产生了深刻影响，新型供需互动行为呈现出互动主体拓宽、商业模式多样、市场机制耦合等重要特征。

1. 互动主体拓宽

以往参与需求响应或有序用电的主要是大工业用户，具有数量少、单体用能成本高、灵活性资源多的特点。然而，随着分布式电源、充电桩、储能、智能楼宇等新兴主体的出现，特别是《电力需求侧管理办法（2023 年版）》提出鼓励新型储能、分布式电源、空调负荷、电动汽车等主体依托负荷聚合商、虚拟电厂等形式参与需求响应，供需互动市场主体的数量和类型迅速增加，互动行为复杂化特征也显著增强。未来随着电力市场化改革的不断深入，海量低压用户也被逐步纳入需求侧响应范畴，这些互动对象具有数量大、地理位置分散度高、单体资源有限、响应行为不确定性大的特点，会给新型供需互动行为的建模、仿真、管理带来较大挑战[31]。

2. 商业模式多样

传统电力系统的供需互动主要依靠需求侧响应，即通过峰谷价格与响应激励来引导用户主动调整用电行为；相应商业模式简单且易操作[32]，但参与门槛较高、获利空间相对有限。电力市场化改革的深入催生了多样化的供需互动商业模式，其中虚拟电厂作为当前最具商业前景的新业态受到较多关注。国外在虚拟电厂方面具有成熟的商业模式，主要通过电价套利、参与调频调压辅助服务市场、参与容量市场等手段获得收益。国内的虚拟电厂项目分布在深圳、上海、冀北、山西等地，项目建设运营方主要为国有资本，相应的商业化和标准化程度有待提升。此外，分布式能源交易、共享储能服务、碳排放管理等新兴商业模式也在有序推进。可以预见，新型供需互动将配套多样化的商业模式，通过市场化手段持续提升分布式资源参与供需互动

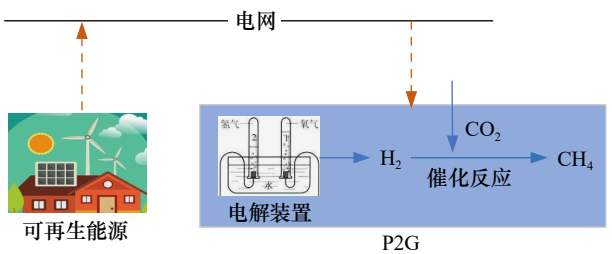


图 2　P2G 技术示意图

的积极性和响应效果。

3. 市场机制耦合

电能量、碳排放、绿证、氢能等类型的市场化交易机制正在不断完善，目前各自市场的运行相对独立。然而，参与的市场主体高度重合，在不同交易市场机制下仍会对用能行为、交易策略产生复杂影响，进而干预市场出清价格。以电、碳交易市场为例，电价、碳价的波动会同时对化石能源发电企业的生产计划产生影响，二者的互动关系呈现正相关：当现货市场电价上升时，发电企业的增发行为会使碳配额紧张，导致碳市场价格提升；当现货市场电价下降时，会导致碳市场价格降低。绿证 / 绿电交易也可能对电力市场价格产生影响。风电、光伏等清洁能源有绿电属性，在中长期交易中往往出现溢价现象，如山东省试点的风电和光伏交易均价较煤电均价高 8%~12%[33]。因此，同一市场主体在不同市场机制耦合作用下的用能行为非常复杂，导致参与供需互动的不确定性增强。

（三）互动技术智能化

人工智能（AI）、小微传感、区块链、边缘计算等数字化支撑技术的进步，尤其是感控能力提升、分析决策优化、安全可信增强等能力的提升，为新型供需互动发展提供了更大的空间。

1. 感控能力提升

感控能力涉及对电力系统运行数据、设备状态、调控潜力的实时感知和控制，由系统的信息化、智能化水平决定，也是各场景下开展供需互动的基础。随着透明电网的发展[34]，各类小微传感器、一次 / 二次融合低压开关、智能微断等在新型低压配用电系统中广泛应用，解决了传统传感设备运维成本高、部署复杂的问题，为新型供需互动提供了数据支持和调控基础。非侵入式负荷监测无需安装传感设备即可获取户内负荷数据，得到了较多关注[35]。智慧楼宇、电动汽车车网互动、智慧风电场等示范工程的落地，反映了供需两端感控能力的显著提高。

2. 决策水平优化

大模型等 AI 技术的不断发展，在新型供需互动业务中的应用逐步落地。在发电侧，风电、光伏等强不确定性的新能源厂站正在依托大模型技术提高发电功率预测的准确度[36]。在电网侧，中国南方电网有限责任公司发布的“大瓦特”模型在电力调度、输变配等方面得到应用，提高了系统运行安全性[37]。在用户侧，国家电网有限公司提出了应用知识大模型预测用户侧负荷的方法，显著提高了预测精度和稳定性[38]。未来，面对复杂的电力市场环境、多样化的商业模式，大模型、智能体等技术将赋能各类供需互动主体并提高决策优化水平。

3. 安全可信增强

数据流的安全可信水平可对市场主体参与供需互动的积极性产生影响。以太坊、超级账本等区块链平台不断完善，具有不可篡改、全程留痕、可追溯的技术优势，可为不同类型的供需互动模式提供安全可信的交易环境。在能源行业，应用数据编织工具开发了私有区块链平台，确保分布式光伏与电动汽车、家庭储能等小型灵活资源之间开展能源交互的有效性[39]。在以太坊上运营的能源区块链平台，为可持续能源提供了灵活交易与实时跟踪服务[40]。近年来，边缘计算技术兴起，可通过部署在供需终端的计算设备构建信息防护屏障。相较远离数据源的云计算平台，边缘计算终端更加靠近数据源，在保护数据源信息安全、发现网络攻击威胁方面具有良好的灵活性。未来，区块链和边缘计算相结合，将为海量分布式可调资源参与供需互动提供技术可行性。

四、分布式资源聚合适应新型供需互动的探究

（一）分布式资源聚合的作用

海量的分布式资源具有单体容量小、位置分散的特点，接入的无序性不仅会加剧电力系统的运行调控风险，而且不利于挖掘资源自身的灵活调节潜力。在新型供需互动关系下，分布式资源以聚合方式参与电网调控与市场交易将是必然趋势。分别从电网调控视角、市场交易视角讨论分布式资源聚合的作用与潜力。

从电网调控视角看，分布式资源的异构特性容易引发多重运行风险，针对单体的直调直控也面临多重现实壁垒。鉴于分布式资源的基本特点，若电网公司开展直调直控需付出极高的管理成本，如需要构建精细化的资源模型、支持实时数据采集、配套完善的信息安全防护体系。相关设备改造和系统

维护产生的额外投入，将显著增加电网企业的运营负担。为此，通过分布式资源聚合形成外部可调特性的方式更具可行性，能够显著降低调控复杂度，为分布式资源的规模化发展提供有效支撑。

从市场交易视角看，非聚合形态下的分布式资源难以形成规模化应用场景下的市场竞争力。在电力市场建设初期，各类资源主体通常追求个体利益最大化。光伏、风电、小水电等电源型分布式资源多以最大化发电量为目标，并不关注其他调节需求。负荷型资源会根据当地的峰谷电价来调整自身的用电行为，但响应程度不一。储能型资源一般位于用户表后，通常仅考虑用户峰谷价差并制定充放电行为。这种“各自为政”的运营模式难以在日益复杂的市场环境下形成规模化竞争优势。相较之下，通过分布式资源聚合，可以利用不同资源之间的功率互补特性和电量聚集效益来提升对外调节能力与市场议价空间，从而为参与电能量、辅助服务、绿电交易、碳市场等多元化市场交易创造有利条件。

（二）分布式资源聚合面临的挑战

从“信息 – 物理 – 社会”系统视角看，分布式资源聚合包括信息系统的数据聚合、物理系统的能量聚合、社会系统的价值聚合3个方面。基于信息、物理、社会等因素的划分，梳理了分布式资源聚合在感知、建模、调控、规划、交易环节面临的关键挑战（见图3）。

1. 聚合感知挑战

从信息视角看，分布式资源聚合感知的挑战在于应对分散采集过程中面临的数据质量参差不齐的问题。分布式资源的量测资源配置不统一，运行过程中的数据采集广泛存在不同步、不准确、不完整的“灰数据”现象[41]，不仅会造成资源聚合外特性的辨识失准，而且会因缺少可靠且有时效性的数据造成资源协同困难、实时互动效果不佳等问题。

从物理视角看，聚合感知的关键挑战在于准确预测分布式资源发 / 用电行为。不同分布式资源主体的设备工况、用能需求多随环境动态变化，许多资源分布在系统各处，可观、可控、可调、可测（“四可”）能力不足。这就导致依赖大量实时数据的感知方式应用困难，不得不在有限量测、资料不足的条件下开展发 / 用电行为态势的精准感知。

从社会视角看，聚合感知的关键挑战在于多元市场环境下感知用户心理行为。市场主体之间可能存在“羊群效应”，当部分市场主体用户因恐慌而集体调整交易策略时，会引发市场价格的非理性波动。关于用户心理描述的现有研究，较多基于行为经济学进行损失与收益的评价，通常依赖一些主观性的参数而致用户心理感知效果不佳。

2. 聚合建模挑战

从信息视角看，聚合建模的关键挑战在于建立考虑分布式资源集采特点的数据质量评估模型。分布式资源配置的量测资源不同，运行数据在采集频

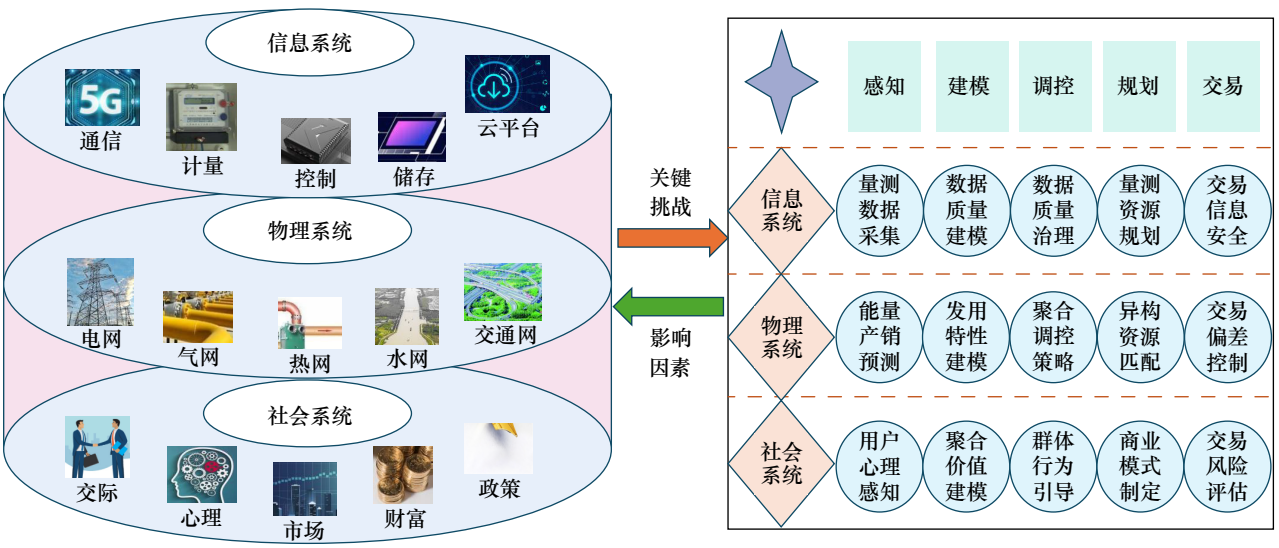


图3　聚合效果的影响因素与关键挑战

率、精度、时效性、可信度等方面存在较大差异，相应的数据质量问题需要从多个维度进行评估。部分量测数据质量问题具有隐蔽性，难以开展直接观测和建模。

从物理视角看，聚合建模的关键挑战在于动态刻画不同类型分布式资源聚合后的发 / 用电特性。分布式资源发 / 用电特性各异，接入点功率受配电网约束限制也不相同，分布式资源之间的交易行为也会对能量流产生影响。在多因素耦合作用下建立分布式资源聚合后的发 / 用电特性动态模型存在较高的难度。

从社会视角看，聚合建模的关键挑战在于针对各类型分布式资源主体的聚合价值评估建模。聚合商希望量化评估各类型分布式资源主体在不同聚合模式下的价值。分布式资源主体希望量化评估被不同运营商聚合时带来的价值。在分布式新能源全面入市、新兴商业模式不断涌现的背景下，市场主体的聚合价值评估将趋于复杂化。

3. 聚合调控挑战

从信息视角看，聚合调控的关键挑战在于对采集的“灰数据”进行统一清洗、缺补以提升感知数据质量。分布式资源规模不一，量测装置的配置标准各异，导致“灰数据”特征也不尽相同，难以形成统一且标准化的处理方法。一般需要结合数据应用场景进行差异化处理，整体治理难度较高[42]。

从物理视角看，分布式资源聚合调控的挑战在于根据聚合分布式特性来分解调控指令以应对不同场景下的对外调控目标。在常规场景下，对海量、异质、泛在、跨节点的分布式资源进行调控时，调控决策空间维度过高，实时优化难度极大。在极端场景下，容易出现大规模需求激增或电源缺失问题，需要预留应急调控能力，相应的个体调控约束将更加严格。

从社会视角看，聚合调控的关键挑战在于制定有效的激励手段以引导聚合分布式资源群体的发 / 用电行为。分布式资源个体的从众、比价、效用趋优等特点鲜明，激励手段的效果评估需要综合考虑个体与环境因素的交互影响，适宜根据市场主体反馈来调整激励的幅度。

4. 聚合规划挑战

从信息视角看，聚合规划的关键挑战在于合理规划配置量测资源以在不显著增加成本的基础上提升数据的采集效率。分布式资源需要进行“四可”改造以利于接入调度运行系统，开展数据采集方案的差异化规划以及采集、通信设备的优化配置与接入点选择是需要重点解决的事项。

从物理视角看，聚合规划的关键挑战在于针对不同类型分布式资源进行选择性聚合以实现异构资源特性的优势互补。在电能量、辅助服务、绿电、碳排放等多元市场机制下，分布式资源聚合实际上是各资源主体之间的双向选择与匹配过程。根据各类分布式资源的物理特性与价值偏好来制定满足不同场景的聚合方案，是需要深入研究的课题。

从社会视角看，聚合规划的关键挑战在于制定合理的商业模式并通过内外博弈的方式实现个体与聚合体收益的最大化。聚合运营商需要针对待聚合的分布式资源个体差异，制定公平合理的价格发现与成本分摊机制，降低运营风险并驱动聚合资源价值的双向传导。

5. 聚合交易挑战

从信息视角看，聚合交易的关键挑战在于保障交易过程中包括数据可信、交易公平、隐私保护在内的信息安全。电力物联网快速发展，用户侧海量智能终端设备的接入在提升系统灵活性的同时，显著扩大网络攻击概率、增加数据泄露风险。在交易过程中兼顾数据可用性、用户信息隐私性是亟待破解的难题。

从物理视角看，聚合交易的关键挑战在于复杂市场环境下控制交易策略存在偏差[43]。在市场机制多元化、交易操作高频化、市场风险多极化的背景下，传统上依靠交易员经验进行交易的方式不再适用，因交易策略偏差可能造成的亏损风险也显著增加。

从社会视角看，聚合交易的关键挑战在于评估不同市场主体的交易风险。在聚合交易中，部分聚合商采用盲目扩张的策略，并未充分考虑各省份的交易政策细节，容易扰乱市场秩序并导致市场价格发现功能失灵；一旦未来市场价格走势不及预期，很容易面临高额亏损并引发规模性的合同违约。一些市场力较大的聚合商如有策略不当，甚至可能影响市场交易价格、波及电网系统安全运行。需要量化评估各类市场参与者的信用行为、履约能力、潜在道德风险，为建立科学的市场机制提供依据。

五、分布式资源聚合适应新型供需互动的应用前瞻

（一）典型场景

1. 车网互动场景

超快充、有序充电、车网互动的发展带动了电动汽车产业链的技术迭代升级，为交通运输领域的绿色低碳转型提供了重要支撑。作为新型分布式负荷资源，新一代充电桩 / 站依托电力电子等智能化技术实现电动汽车快速、有序、反向充电，这一运行特性对电力系统而言既有挑战又有价值。2025 年，中国南方电网有限责任公司组织开展了国内首次车网互动跨省联动，覆盖广州、深圳、海口、昆明等 63 个城市，互动电量超过 5×10^5 kW·h，电动汽车参与超过 1×10^5 辆次，验证了车网互动规模化应用的潜力[44]。德国 Enertrag 车网互动可再生能源消纳项目利用北部地区过剩的风电为多辆电动汽车充电，在风电出力因传输瓶颈受限时由电动汽车向南部地区的电网放电（替代南部地区的燃气发电），提高了风电消纳率并为车主提供了收益渠道[45]。随着电动汽车保有量增加、车网互动技术进步，充电站运营商聚合电动汽车车主参与多样化的车网互动场景将成为常态。

2. 电 – 氢互动场景

氢能产业链涉及交通、航天、船舶、化工等领域，附加价值高，具有长周期储能、低碳环保的优势。当前电网中大量接入了分布式可再生能源，“新能源+绿氢”有望支撑新型电力系统深度脱碳、平抑波动、韧性提升。通过电解设备将可再生电能转化为氢能，既能提高可再生能源消纳水平，又可获得清洁的氢气能源。氢作为储能介质参与“低谷储电、高峰放电”，将缓解电网负荷高峰压力。在长沙经济技术开发区氢能示范园区，采用光伏绿电与电网谷电进行电解水制氢，服务氢能渣土车、重卡、物流车等运输车辆，年产值超过 2 亿元[46]。挪威国家电网公司利用氢能的长期储存特性，解决了风电“冬多夏少”的跨季节供需失衡问题[47]。随着“电 – 氢 – 交通”耦合生态的发展，电 – 氢互动将在减少交通领域碳排放、为电网调峰提供蓄能支持方面取得综合收益。

3. 电 – 碳互动场景

近年来，我国发布了一系列促进碳减排的政策文件，从控碳行业范围、碳交易市场、碳减排手段等方面出发，明确了重点行业、地方、企业的碳排总量与碳排强度的控制目标。可以预见，企业不仅是能源的被动消费者，更应成为通过用电选择主动塑造绿色电力需求、影响碳市场供需的积极参与者。江苏省镇江市构建了能源和碳排放管理平台，为出口企业提供碳足迹溯源，协助企业优化用电模式并参与绿电交易，提高了电 – 碳互动水平[48]。欧盟化工行业通过实时碳监测与绿电耦合来推动深度脱碳，大幅降低了乙烯等核心产品的碳排放水平[49]。未来，在电力系统碳排放精细化管理的背景下，有望建立时变碳排因子或边际碳排因子，反映需求侧的用能充裕程度和清洁程度，体现供给侧的碳排放水平对用户侧用能行为的影响。各行业开展电 – 碳互动的规模和形式也将进一步拓展，新型供需互动将在经济性、低碳性方面取得平衡。

（二）关键技术

1. 多元小微传感技术

为了获取高质量、大密度、低时延的分布式资源运行数据，提高末端数据采集效率成为亟需，多元小微传感技术是其中的关键支撑之一。小微传感技术是组成泛在传感网络的最小单位，能够提供全面、精准的系统运行监测数据；目前的研究重点是微机电系统技术应用，以缩小传感器体积的方式来提高传感场景的通用性与空间利用率[50]。南方电网数字电网集团有限公司研发了“极目”系列电流、电压、电气量集成传感器产品，在电力小微传感器材料与工艺国产化方面取得突破[51]。多元融合传感技术也是重要发展方向，不仅可以精准感知电气量数据，而且能够测量温度、声音、振动、气体等状态量参数[52]。此外，量子通信可实现电力调控信息的远距离、高实时传输，在实时远程采集具有地域分散特点的分布式资源运行数据方面具有良好潜力，发展成熟后将显著提升数据质量、促进聚合调控业务壮大[53]。

2. 互动博弈行为建模技术

在分布式资源聚合过程中，交易行为涉及多主体博弈关系，相应建模则是在多元市场机制下对多主体博弈策略、博弈收益、博弈均衡的量化分析，成为引导聚合形态下分布式资源发 / 用电行为、制定收益分配的重要依据。在多元化市场机制、多样

化商业模式、多类型市场主体的发展背景下，分布式资源聚合面临更加复杂的博弈场景，相应的博弈关系分为合作博弈、非合作博弈等。在合作博弈建模中，通常假定所有联盟成员具有相同的分配权重，忽视分布式资源可控特性的差异，存在分配结果不公平的问题。在非合作博弈方面，基于主从博弈的上下层博弈主体建模较为常见，应用领域有电力设备投资、电力市场定价、需求侧管理资源交易、综合能源服务交易等。随着电、碳、氢等市场机制的耦合以及商业模式的进一步丰富，分布式资源个体与个体之间、个体与聚合体之间的博弈关系趋于复杂，有必要对复杂混合博弈场景下的个体行为进行细致的建模研究。

3. 数据驱动的智能决策技术

随着用户用电行为、设备运行状态、环境干扰因素等多源数据的复杂度及规模持续攀升，传统机理模型驱动的决策模式不再适配分布式资源聚合场景下复杂多变的用能环境，以数据驱动为核心的智能决策方法受到较多关注。强化学习作为AI技术的代表，已在分布式资源聚合调控、综合能源系统能量调度、多元市场交易决策、配电网多主体电压协同控制等场景中获得应用[54]。以ChatGPT为代表的AI大模型技术快速兴起，为构建大模型驱动的电力系统智能决策技术体系提供了关键支撑。大模型融合注意力机制、深度神经网络等核心技术，可从海量历史数据中自主学习多因素之间的复杂耦合模式与关联特征，能够显著提升电力系统预测精度与优化决策效率[55]。然而，强化学习、大模型技术在聚合调控中的应用仍面临模型“幻觉”、解释性不足、安全约束无法保证等难题，制约了工程应用进展。

4. 异构资源双向优化聚合技术

在多元市场环境下，聚合商与分布式资源之间存在差异化的利益诉求与风险偏好。现有的分布式资源聚合案例是以市场协同优化为主的静态单边聚合，忽略聚合商和被聚合资源之间的协同匹配进而导致聚合效果受限。异质资源双向优化聚合技术有利于兼顾双方需求，既允许分布式资源主体依据自身成本与偏好选择最优聚合商，也支持聚合商精准筛选分布式资源。在对异质分布式资源进行双向聚合的过程中，聚合商需要提取不同市场环境下分布式资源的差异化特性，据此开展资源分类[56]。目前主要按照设备类型、资源特性进行分类，如在调频市场场景下将分布式资源划分为正电源、负电源、储能电源[57]。也要注意到，在现实的聚合场景中，聚合精度通常仅细化到用户层面的功率外特性，也就限制了聚合商对资源内部灵活性的充分挖掘。此外，在异质资源的双向聚合过程中，会存在信息不完全、有限理性的情况，资源主体或聚合商可能因资源响应能力与市场供需形势发生变化而致聚合效果不佳[58]。在大部分双向聚合规划中，注重的是聚合匹配效率而忽略聚合公平性。随着能源公平性得到更多重视，兼顾收益分配公平性和聚合效率成为待研究的课题[59]。可以预见，未来的分布式资源聚合规划将因涉及资源类型、市场机制、商业模式而趋于复杂化，相应规划的合理性直接决定后续参与电网互动与市场交易的优化空间。

5. 多市场量化交易技术

分布式资源主体可同时参与电能量、辅助服务、容量、绿证交易等市场，任意交易窗口涉及的决策类型多且频次高，需要依托量化交易技术，即利用数学模型、统计分析、计算机算法等量化工具，对电力相关交易标的进行价格预测、风险评估、策略构建、自动执行。多市场量化交易技术需要与多市场出清建模、多市场尺度动态决策等配合使用。在多市场交易建模方面，建立了储能参与“电能量–惯量–一次调频”的交易模型[60]、虚拟电厂参与电–碳市场的交易决策模型[61]。在决策计算方面，强化学习具有适应不确定性环境的优势，支持构建社区能源交易的高效决策方案[62]。未来，面向海量分布式资源的多市场交易决策将面临高维异构数据的分布式管理与计算难题，需要增强基于AI大模型、高性能计算的智能决策能力。

（三）灵活机制

1. 基于个体联盟的价值共创机制

为了实现针对分布式资源聚合的生态系统价值创造最大化和最合理分配，需要设计合适的商业模式。不同的聚合形态适配不同的商业模式，根据分布式资源聚合的组织与协作特点，可将聚合形态划分为独立自主型、结盟推动型、平台引领型、平台结盟型[63]，这为理解多元化商业模式与聚合形态的适配关系提供了有益视角。共享储能是面向结盟推动型的典型商业模式，可通过租赁形式实现储能控

制权在不同主体之间的转移；在共享储能模式下，可利用智能合约规则集来调和各方利益冲突。虚拟电厂是面向平台引领型聚合体的典型商业模式，虚拟电厂运营商协调分布式资源调控能力参与调频、备用等服务；鉴于可能存在的容量“冗余”情况，还在商业模式中引入“超售”概念来进一步提升资源利用率[64]。随着碳、氢、热、冷等元素的进一步参与，需要设计多元化的聚合商业模式以利于扩大参与者范围。

2. 基于区块链的多方可信交易机制

随着分布式能源与供需互动的深入发展，交易主体趋于多元化、去中心化，因而建立可信且透明的交易环境变得至关重要。区块链技术具有分布式账本、不可篡改、智能合约等核心特性，与相关需求高度契合，能够保障交易数据的真实性、一致性、全程可追溯性[65]。应用区块链技术，不仅赋予所有参与方平等的知情权与监督权，而且推动由“中心管控”向“多方共治”的交易模式转变，有助于增强各类用户参与聚合交易的意愿和对系统安全性的信任。为了进一步提升交易系统的鲁棒性，可将区块链、边缘计算等技术结合应用，即边缘节点处理局部数据与即时交易、区块链负责全局共识与可信记录，共同增强网络与数据安全防护能力。隐私安全防护技术尽管有助于防止数据泄露，但也可能导致数据的可用性和完整性受损进而影响数据质量安全验证，未来需开展新技术探索以兼顾数据的隐私性、可用性、完整性。

（四）发展前景

1. 推动全社会资源优化配置

未来的供需互动将从空间、行业维度全面拓展，有利于推动全社会的资源优化配置。在空间维度上，城乡区域之间的供需互动将逐步落地，农村分布式光伏、灌溉耕种负荷与城市工业负荷、商业化储能将形成“源荷储”互济网络，再通过虚拟电厂聚合实现低谷储电、高峰放电的跨区域资源优化，起到助力乡村能源振兴、缓解城市电网削峰压力的综合作用。跨境供需互动机制也将逐步建立，可依托区块链等可信交易技术，推动我国西北地区的风光发电与中亚负荷、蒙古国风电与京津唐负荷的跨境协同，为破解区域新能源消纳不均衡难题提供新途径。在行业维度上，互动场景将从交通、工业、建筑延伸至农业、应急救援等领域。东北农业区正在试点光伏灌溉、秸秆生物质利用、农业负荷智能调节等新型供需互动模式[66]，实现农业生产与能源互动的双赢。面对极端天气，分布式资源快速聚合形成应急能源网络，能够保障医院、避难所等关键负荷的供电稳定[67]，将成为未来特定区域和时段下供需互动的典型场景之一。

2. 助力能源系统普惠和安全发展

技术、市场、社会深度耦合，将推动供需互动和社会用能朝着普惠和安全方向演进。在技术方面，数字孪生、AI大模型、量子通信的融合应用将推动供需互动的全链条升级，也使互动响应时延从分钟级压缩至秒级并促成多样化供需互动模式。在市场方面，普惠性机制将逐步完善并支持电力市场化普及、聚合商让利、碳信用兑换等模式，合理降低低压工商业用户甚至居民用户的参与门槛，推动能源红利的全民共享。此外，统一的灵活性资源价值量化标准将逐步构建，“电 – 碳 – 氢”市场联动也成为常态，用户互动行为可同步获得电能收益、辅助服务补偿、碳配额收益。在社会层面，逐步构建“去中心化”的能源网络，降低对大电网、化石能源的依赖度，提升能源系统应急韧性。未来的新型供需互动将是电力系统安全低碳运行的技术保障手段，也成为推动能源普惠和安全发展的重要载体。

六、结语

本文结合新型电力系统建设背景，系统阐述了新型供需互动的基本内涵、演变阶段、发展特征，分析了分布式资源聚合在感知、建模、调控、规划、交易等环节面临的关键挑战，从典型场景、关键技术、灵活机制、发展前景等方面探讨了分布式资源聚合适应新型供需互动的未来趋势。研究认为，当前电力系统供需互动正在由计划型、市场型向自治型演进，整体呈现互动元素多元化、互动行为复杂化、互动技术智能化特征；应重点关注车网互动、电 – 氢互动、电 – 碳互动等典型场景，加速分布式资源聚合相关的多元感知、博弈建模、智能决策、双向优化、多市场交易等关键技术突破，完善价值共创和可信交易机制，推动分布式资源规模化、市场化参与供需互动，为提升新型电力系统灵活调节能力提供新的支撑。

展望未来，分布式资源聚合需深化跨域协同和技术融合，以更大力度促进新型电力系统高效低碳演进。聚焦信息物理社会的多维度耦合，依托数字孪生、边缘计算等技术，突破跨能源感知壁垒，提升动态建模与实时调控精度，适配高比例新能源接入需求。同步完善市场化交易规则与收益分配机制，激发用户侧的参与活力。拓展微电网集群等规模化场景，细化多领域差异化聚合方案。在打通技术、机制、场景协同壁垒的基础上，推动分布式资源高效聚合并深入挖掘灵活潜力，为“双碳”目标落地、电力系统高质量发展提供有力支撑。

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: November 9, 2025; **Revised date:** December 24, 2025

Corresponding author: Zhang Yongjun is a professor from the School of Electrical Power Engineering, South China University of Technology. His major research fields include intelligent distribution network, distribution network optimization and planning. E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

Funding project: The National Natural Science Foundation of China Project (52177085)

参考文献

[1] 侯恺，刘泽宇，贾宏杰，等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2697-2710.
Hou K，Liu Z Y，Jia H J，et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering，2023，49(7)：2697-2710.

[2] 陈晓红，张高南，张乘，等. 数字技术赋能新型电力系统安全韧性提升的策略研究[J]. 中国工程科学，2025，27(1)：168-179.
Chen X H，Zhang G N，Zhang C，et al. Strategies for enhancing security resilience of new power systems enabled by digital technology[J]. Strategic Study of CAE，2025，27(1)：168-179.

[3] 唐文虎，黄文威，郭采珊，等. 分布式智能电网的理论发展与技术体系[J]. 电网技术，2025，49(3)：855-867.
Tang W H，Huang W W，Guo C S，et al. Exploration on theoretical and technological framework of distributed smart grid[J]. Power System Technology，2025，49(3)：855-867.

[4] 侯慧，何梓姻，侯婷婷，等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(14)：177-187.
Hou H，He Z Y，Hou T T，et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. Power System Protection and Control，2024，52(14)：177-187.

[5] 昌力，曹荣章，吉斌，等. 电力现货市场交易运营的未来重大需求与关键技术[J]. 电力系统自动化，2024，48(4)：34-48.
Chang L，Cao R Z，Ji B，et al. Future major demands and key technologies in trading operation of electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(4)：34-48.

[6] 贾乾罡，陈思捷，严正，等. 基于区块链的空调负荷用电权分配：模式与方法[J]. 中国电机工程学报，2020，40(11)：3393-3402.
Jia Q G，Chen S J，Yan Z，et al. Blockchain-enabled power usage quotas allocation method for air conditioning loads[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(11)：3393-3402.

[7] 王宣元，刘蓁. 虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：158-168.
Wang X Y，Liu Z. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(18)：158-168.

[8] 李嘉媚，艾芊，殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：37-55.
Li J M，Ai Q，Yin S R. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(1)：37-55.

[9] 葛磊蛟，刘航旭，孙永辉，等. 智能配电网多元电力用户群体特性精准感知技术综述[J]. 电力系统自动化，2023，47(20)：174-191.
Ge L J，Liu H X，Sun Y H，et al. Review on accurate awareness technology for characteristics of diversified power user groups in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(20)：174-191.

[10] 陈启鑫，吕睿可，郭鸿业，等. 面向需求响应的电力用户行为建模：研究现状与应用[J]. 电力自动化设备，2023，43(10)：23-37.
Chen Q X，Lyu R K，Guo H Y，et al. Electricity user behavior modeling for demand response：Research status quo and applications[J]. Electric Power Automation Equipment，2023，43(10)：23-37.

[11] 唐家俊，吴晓刚，张思，等. 基于Gale-Shapley算法的虚拟电厂与分布式资源匹配机制[J]. 电力系统自动化，2022，46(18)：65-73.
Tang J J，Wu X G，Zhang S，et al. Matching mechanism for virtual power plants and distributed energy resources based on Gale-Shapley algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(18)：65-73.

[12] 代心芸，陈皓勇，肖东亮，等. 电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J]. 电网技术，2022，46(11)：4169-4186.
Dai X Y，Chen H Y，Xiao D L，et al. Review of applications and researches of industrial demand response technology under electricity market environment[J]. Power System Technology，2022，46(11)：4169-4186.

[13] 严康，陆艺丹，于宗超，等. 配电网用户侧异构电力物联设备安全研究综述及展望[J]. 电力自动化设备，2023，43(3)：146-158.
Yan K，Lu Y D，Yu Z C，et al. Review and prospect of research on security of user-side heterogeneous power IoT devices in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment，2023，43(3)：146-158.

[14] 关于组织开展2025年广东电力市场低压工商业用户试点参与市场化交易相关工作的通知[EB/OL]. (2024-11-25)[2025-12-

15]. https://pm.gd.csg.cn/portal/#/home/informationNotice/detail id=14987&noticeTypeId=31.
Notice on organizing and carrying out the pilot work for low-voltage industrial and commercial users to participate in market-oriented transactions in Guangdong electricity market 2025[EB/OL]. (2024-11-25)[2025-12-15]. https://pm.gd.csg.cn/portal/#/home/informationNotice/detail id=14987&noticeTypeId=31.

[15] Zhang H L, Zhou S Y, Gu W, et al. Optimal operation of micro-energy grids considering shared energy storage systems and balanced profit allocations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 254-271.

[16] Mahin A U, Ahmed F, Joos G. Aggregation and control of DERs in a distribution system for the provision of grid services[C]// 2024 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2024: 603-608.

[17] Sharifishourabi M, Dincer I, Mohany A. An innovatively designed community-based hybrid energy system to generate its needs of electricity, heat, hot water and hydrogen in a sustainable manner[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 129: 106489.

[18] Jalalian H, Samiei Moghaddam M, Vahedi M, et al. Optimization of integrated energy systems for enhanced grid flexibility using the meerkat optimization algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 172: 111263.

[19] Sun J, Liu J, Chen H, et al. Experiences and lessons learned from DR resources participating in the US and UK capacity markets: Mechanisms, status, dilemmas and recommendations[J]. IEEE Access, 2022, 10: 83851-83868.

[20] Sheela A, Surendar V, Gowthamkrishna S G, et al. Wireless load monitoring system for automatic demand response[C]//2022 International Conference on Sustainable Computing and Data Communication Systems (ICSCDS), 2022: 815-823.

[21] 李岩学, 高伟俊, 张晓易, 等. 日本零能耗住宅及智能化家庭能源管理系统应用现状研究[J]. 中外能源, 2019, 24(10): 89-97.
Li Y X, Gao W J, Zhang X Y, et al. Zero energy house in Japan and the application of smart home energy management system[J]. Sino-Global Energy, 2019, 24(10): 89-97.

[22] Zahraoui Y, Korõtko T, Rosin A, et al. A competitive framework for the participation of multi-microgrids in the community energy trading market: A case study[J]. IEEE Access, 2024, 12: 68232-68248.

[23] 虚拟电厂②|欧美玩家及国内外虚拟电厂对比[EB/OL]. (2023-02-17)[2025-12-15]. https://www.beipa.org.cn/newsinfo/5384611.html.
Virtual power plant ②|Comparison of European and American participants and virtual power plants at home and abroad[EB/OL]. (2023-02-17)[2025-12-15]. https://www.beipa.org.cn/newsinfo/5384611.html.

[24] Waseem A, Bilal M, Bhardwaj A, et al. Cryptocurrency-enabled energy trading in micro-grid using blockchain technology[C]// 2024 2nd International Conference on Cyber Resilience (ICCR), 2024: 1-7.

[25] 马继洋, 蔡永翔, 唐巍, 等. 考虑电动汽车参与韧性提升的配电网状态平滑切换控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 29-36.
Ma J Y, Cai Y X, Tang W, et al. Enhancing distribution network resilience: Electric vehicle integration in seamless state switching strategy[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 29-36.

[26] 马铭辰, 李姚旺, 杜尔顺, 等. 多时段边际碳排放因子及其不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(18): 14-24.
Ma M C, Li Y W, Du E S, et al. Marginal carbon emission factors in multiple time periods and analysis of their uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(18): 14-24.

[27] Zhou S B, Zhou M, Wu Z Y, et al. Dual-drive coordinated operation strategy for Internet data centers by exploiting spatiotemporal flexibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141741.

[28] 李咸善, 仇成龙, 张远航, 等. 考虑电碳需求响应的电动汽车集群市场化运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 163-174.
Li X S, Qiu C L, Zhang Y H, et al. Market-oriented operation strategy for EV clusters considering electricity-carbon demand response[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 163-174.

[29] 陈伯达, 林楷东, 张勇军, 等. 计及碳捕集和电转气协同的电气互联系统优化调度[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 9-17.
Chen B D, Lin K D, Zhang Y J, et al. Optimal dispatching of integrated electricity and natural gas energy systems considering the coordination of carbon capture system and power-to-gas[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(11): 9–17.

[30] 陈泽兴, 林楷东, 张勇军, 等. 电–气互联系统建模与运行优化研究方法评述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 11-23.
Chen Z X, Lin K D, Zhang Y J, et al. A review of modeling and optimal operation of integrated electricity–gas system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 11-23.

[31] 马麟, 梁安琪, 王立永, 等. 公共楼宇可调负荷资源调控技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 1-10, 22.
Ma L, Liang A Q, Wang L Y, et al. Review of research on regulation technology of adjustable load resources in public buildings[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 1-10, 22.

[32] 电力负荷管理办法(2023年版)[EB/OL]. (2023-09-07)[2025-12-15]. https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20275.
Measures for power load management (2023 edition)[EB/OL]. (2023-09-07)[2025-12-15]. https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20275.

[33] 电力规划设计总院. 2024年度中国电力市场发展报告[R]. 北京: 电力规划设计总院, 2024.
China Electric Power Planning and Engineering Institute. China electricity market development report 2024[R]. Beijing: China Electric Power Planning and Engineering Institute, 2024.

[34] 李立涅, 蔡泽祥, 唐文虎, 等. 透明电网理论框架与关键技术[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 32-43.
Li L C, Cai Z X, Tang W H, et al. Theoretical framework and key technologies of transparent power grid[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 32-43.

[35] 王磊, 马佳琪, 韩肖清, 等. 考虑多状态特征的非侵入式负荷识别方法[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4720-4728.
Wang L, Ma J Q, Han X Q, et al. Non-intrusive load monitoring method with multi-state characterization of loads[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4720-4728.

[36] 袁振邦. 基于AI大模型技术的新能源发电功率预测优化方法及系统[J]. 中国高新科技，2024(16)：85-87.
Yuan Z B. New energy generation power prediction and optimization method and system based on AI large model technology[J]. China High and New Technology，2024(16)：85-87.

[37] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网数字化转型白皮书[R]. 广州：中国南方电网有限责任公司，2025.
China Southern Power Grid Co.，Ltd. CSG digital transformation white paper[R]. Guangzhou：China Southern Power Grid Co.，Ltd.，2025.

[38] 国网冀北电力有限公司，国网冀北电力有限公司信息通信分公司，国家电网有限公司. 一种知识大模型预测用户侧负荷方法、装置及设备：202311500219.3[P]. 2024-02-02.
State Grid Hebei Electric Power Co.，Ltd.，Information and Communication Branch of State Grid Hebei Electric Power Co.，Ltd.，State Grid Co.，Ltd. A knowledge large model to predict user side load method，device and equipment ：202311500219.3[P]. 2024-02-02.

[39] Integrating distributed，renewable energy sources into the grid with blockchain and IBM[EB/OL]. (2022-04-01)[2025-12-15]. https://www.ibm.com/case-studies/tennet.

[40] Power Ledger. Our platform is modular and scalable：All our products can be contracted separately，scaling as needed[EB/OL]. (2022-04-01)[2025-12-15] .https://www.powerledger.io/platform.

[41] Yi Y Q，Zhou L，Li Q H，et al. Improving correlation-based consumer phase identification for incomplete data[C]//2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)，2020：2533-2538.

[42] 刘斯亮，郑泽南，张勇军，等. 计及灰数据的知识－数据驱动低压有源配电网潮流计算[J]. 电测与仪表，2025，62(6)：2-10.
Liu S L，Zheng Z N，Zhang Y J，et al. Knowledge-data-driven power flow calculation for low-voltage active distribution network considering gray data[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2025，62(6)：2-10.

[43] 成润婷，张勇军，李立涅，等. 面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展[J]. 中国工程科学，2023，25(2)：89-99.
Cheng R T，Zhang Y J，Li L C，et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption[J]. Strategic Study of CAE，2023，25(2)：89-99.

[44] 徐佩玉. 车轮上的“充电宝”要来了[EB/OL]. (2025-04-24)[2025-12-15]. https://finance.people.com.cn/n1/2025/0424/c1004-40466812.html.
Xu P Y. Power banks “on wheels” are coming[EB/OL]. (2025-04-24)[2025-12-15]. https://finance.people.com.cn/n1/2025/0424/c1004-40466812.html.

[45] IIM信息. 2025年全球及中国车网互动市场全景分析与展望研究报告[R]. 北京：IIM信息，2025.
IIM Information. Global and China vehicle-to-grid market panorama analysis and outlook research report[R]. Beijing：IIM Information，2025.

[46] 关于公布湖南省工业低碳氢应用场景的通知[EB/OL]. (2025-09-05)[2025-12-15]. https://www.hunan.gov.cn/zqt/zcsd/202509/t20250905_33796555.html.
Notice on announcing industrial low-carbon hydrogen application scenarios in Hunan province[EB/OL]. (2025-09-05)[2025-12-15]. https://www.hunan.gov.cn/zqt/zcsd/202509/t20250905_33796555.html.

[47] Norwegian National Grid Company. 2025 energy report wind–hydrogen grid balancing in Western Norway[EB/OL]. (2025-06-30)[2025-12-15]. https://www.statnett.no/en/publications/energy-reports/.

[48] 镇江“碳平台”绿色场景走向多元[EB/OL]. (2024-12-10)[2025-12-15]. http://www.jsw.com.cn/2024/1210/1878382.shtml.
Zhenjiang green scenarios of the “carbon platform” becoming diverse [EB/OL]. (2024-12-10)[2025-12-15]. http://www.jsw.com.cn/2024/1210/1878382.shtml.

[49] European Environment Agency. Trends and projections in Europe 2025[EB/OL]. (2025-08-01)[2025-12-15]. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2025.

[50] 余涛，梁敏航，罗庆全，等. 新型电力系统专用传感与边缘智能关键技术及其展望[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3324-3338.
Yu T，Liang M H，Luo Q Q，et al. Key technologies and perspectives of specialized sensing and edge intelligence for new power systems[J]. High Voltage Engineering，2024，50(8)：3324-3338.

[51] 南方电网科技成果亮相北京科博会[EB/OL]. (2024-07-16)[2025-12-15]. https://www.csg.cn/xwzx/2024/gsyw/202407/t20240716_341591.html.
Science and technology innovation achievements of China Southern Power Grid showcased at Beijing Science and Technology Expo[EB/OL]. (2024-07-16)[2025-12-15]. https://www.csg.cn/xwzx/2024/gsyw/202407/t20240716_341591.html.

[52] 易仕琪，孔政敏，王帅，等. 一种基于多分类器耦合的非侵入式负荷辨识方法[J]. 广东电力，2023，36(8)：89-96.
Yi S Q，Kong Z M，Wang S，et al. A non-intrusive load identification method based on coupling weak multiple classifiers[J]. Guangdong Electric Power，2023，36(8)：89-96.

[53] 谢海鹏，钱雨琦，付炜，等. 电力系统中量子信息学的应用现状及展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(12)：4485-4507.
Xie H P，Qian Y Q，Fu W，et al. Status and prospect of quantum informatics in power systems[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(12)：4485-4507.

[54] 王仁浚，高红均，罗龙波，等. 基于深度强化学习的新型配电系统优化运行研究综述[J]. 电力自动化设备，2025，45(9)：152-164.
Wang R J，Gao H J，Luo L B，et al. Review of research on new distribution system optimization operation based on deep reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment，2025，45(9)：152-164.

[55] 王皓怀，邓韦斯，戴仲覆，等. 面向新能源功率多时空尺度精确预测的机制创新与平台建设探索[J]. 南方电网技术，2023，17(2)：3-10.
Wang H H，Deng W S，Dai Z F，et al. Mechanism innovation and platform construction for accurate prediction of new energy power at multiple temporal and spatial scales[J]. Southern Power System Technology，2023，17(2)：3-10.

[56] 孙玲玲，李海滨，贾清泉，等. 基于动态重构的虚拟电厂资源聚

合规划方法[J]. 电力系统自动化，2024，48（18）：115-128.
Sun L L，Li H B，Jia Q Q，et al. Planning method for resource aggregation of virtual power plant based on dynamic reconstruction[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48（18）：115-128.

[57] 潘明杰，解大，王西田. 计及分布式资源调节特性差异的虚拟电厂响应策略[J]. 电力系统自动化，2022，46（18）：108-117.
Pan M J，Xie D，Wang X T. Response strategy for virtual power plant considering difference in regulation characteristics of distributed energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46（18）：108-117.

[58] 谢敏，黄莹，李弋升，等. 分布式能源动态聚合于虚拟电厂的演化博弈决策方法和机理分析[J]. 电网技术，2023，47（12）：4958-4970.
Xie M，Huang Y，Li Y S，et al. Evolutionary game decision and mechanism analysis of dynamical aggregation of distributed energy resources into virtual power plant[J]. Power System Technology，2023，47（12）：4958-4970.

[59] 梁博淼，杨甲甲，文福拴，等. 兼顾公平与效率的聚合多元灵活资源虚拟电厂协同规划[J]. 电力系统自动化，2025，49（10）：67-76.
Liang B M，Yang J J，Wen F S，et al. Collaborative planning of virtual power plants aggregating multivariate and flexible resources and balancing fairness and efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems，2025，49（10）：67-76.

[60] 刘继春，刘可欣，柯贤波，等. 新型电力系统下储能参与电能量－惯量－一次调频多市场交易方法[J]. 电网技术，2025，49（3）：1018-1031.
Liu J C，Liu K X，Ke X B，et al. Participation of energy storage in electric energy–inertia–primary frequency regulation multi-market trading method under a new power system[J]. Power System Technology，2025，49（3）：1018-1031.

[61] 张钧钊，姜欣，段世杰，等. 虚拟电厂参与电－碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2023，51（11）：108-118.
Zhang J Z，Jiang X，Duan S J，et al. Bidding strategy for a virtual power plant to participate in the power-carbon joint market[J]. Power System Protection and Control，2023，51（11）：108-118.

[62] 梁泽庭，郑杰辉，方家琨，等. 基于多智能体强化学习的差异化产销者参与社区能源交易方法[J]. 电网技术，2025，49（5）：1826-1836.
Liang Z T，Zheng J H，Fang J K，et al. Multi-agent reinforcement learning for differentiated prosumers participating in community energy trading[J]. Power System Technology，2025，49（5）：1826-1836.

[63] 陈娟，鲁斌，冯宇博，等. 共享理念下的区域能源互联网生态系统价值共创模式与机制[J]. 中国电机工程学报，2022，42（22）：8103-8116.
Chen J，Lu B，Feng Y B，et al. Value co-production model and mechanism of regional energy Internet ecosystem under the concept of sharing[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42（22）：8103-8116.

[64] 叶晨，王蓓蓓，薛必克，等. 考虑超售的共享分布式光储混合运营模式协同策略研究[J]. 电工技术学报，2022，37（7）：1836-1846.
Ye C，Wang B B，Xue B K，et al. Study on the coordination strategy of sharing distributed photovoltaic energy storage hybrid operation mode considering overselling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37（7）：1836-1846.

[65] 黄宇翔，陈皓勇，牛振勇，等. 基于“能量－信息－价值”三层网络的虚拟电厂架构及运行关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制，2024，52（24）：169-187.
Huang Y X，Chen H Y，Niu Z Y，et al. A review of virtual power plant architecture and key operational technologies based on a “energy–information–value” three-layer network[J]. Power System Protection and Control，2024，52（24）：169-187.

[66] 郝淑丽，方子圆. 辽宁：贾家店农场的“零碳”生活[EB/OL]. （2025-12-15）[2025-12-20]. https://news.lnd.com.cn/system/2025/12/15/030539165.shtml.
Hao S L，Fang Z Y. Liaoning：Zero-carbon life at Jiajiadian farm[EB/OL]. （2025-12-15）[2025-12-20]. https://news.lnd.com.cn/system/2025/12/15/030539165.shtml.

[67] 曹燕，邓菲，谢章辉. 全国首个雨雪冰冻灾害县域电网分区组网快速复电应急演练在三明建宁举行[EB/OL]. （2024-12-26）[2025-12-15]. https://sm.fjsen.com/2024-12/26/content_31810678.htm.
Cao Y，Deng F，Xie Z H. China’s first county-level partitioned-network rapid power restoration emergency drill for snow and ice disasters held in Jianning，Sanming[EB/OL]. （2024-12-26）[2025-12-15]. https://sm.fjsen.com/2024-12/26/content_31810678.htm.