



电力圆桌
POWER SECTOR ROUNDTABLE



专题报告

数智技术提升需求侧资源灵活性 ——路径与典型实践

电力圆桌项目课题组

2024年10月

电力圆桌项目

电力圆桌（全称电力可持续发展高级圆桌会议）项目于 2015 年 9 月启动，旨在紧扣应对气候变化、调整能源结构的国家战略，邀请业内专家和各利益方参与，共同探讨中国电力部门低碳转型的路径和策略。通过建立一个广泛听取各方意见的平台机制，电力圆桌将各方关心的、有争议的、目前决策困难的关键问题提交到平台讨论，选出核心问题委托智库开展高质量研究，并将研究成果和政策建议提交到平台征求意见，从而支持相关政策的制定和落地，推动中国电力行业的改革和可持续发展，提高电力行业节能减排、应对气候变化的能力。

项目课题组



国家电网
STATE GRID

中国电力科学研究院有限公司
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

中国电力科学研究院（简称中国电科院）成立于1951年，是国家电网公司直属科研单位，是中国电力行业多学科、综合性的科研机构。中国电力科学研究院主要从事超/特高压交直流输变电技术、电网规划分析及安全控制技术、输变电工程设计与施工技术、配用电技术以及新能源、新材料、电力电子、信息与通信、能效测评及节能等技术的研究。

数智技术提升需求侧资源灵活性 ——路径与典型实践

**Digital Intelligence Technology to Enhance Demand-Side
Resource Flexibility: Path and Typical Practice**

2024 年 10 月

目 录

摘要1

1. 背景 3

 1.1 新型电力系统数智技术的发展背景.....3

 1.2 数智化技术融合现实意义 4

2. 需求侧数智化技术融合方案 6

 2.1 需求侧数智化技术的目标 6

 2.2 需求侧数智化技术的实施路径 8

3. 需求侧分场景参与电网互动的数智化方案 11

 3.1 工业用户参与电网互动..... 11

 3.2 商业用户参与电网互动 13

 3.3 居民用户参与电网互动 15

 3.4 电动汽车参与电网互动 17

 3.5 5G 基站和数据中心参与电网互动.....19

4. 需求侧数智化的评价指标与应用案例 22

 4.1 需求侧数智化评价指标体系 22

 4.2 送端电网的虚拟电厂平台数智化改造实践—宁夏案例 24

 4.3 受端电网的虚拟电厂平台数智化改造实践—重庆案例 26

5. 数智技术提升需求侧资源灵活性面临的挑战与建议.....29

 5.1 研究发现..... 29

 5.2 面临的挑战..... 30

 5.3 发展建议32

参考文献..... 33

作者与鸣谢 35

摘要

在“双碳”目标背景下，我国作为新能源装机大国，新能源并网规模不断增长，波动频度和幅度显著增加。同时，十四五以来，分布式光伏、用户侧储能、虚拟电厂等需求侧产销一体化资源超常规发展，多地区用电负荷屡创新高，源荷双随机特性导致传统源侧、网侧调节资源已经难以满足新型电力系统灵活性调节需求，亟需打造数智化坚强电网，推进数智化技术赋能需求侧以提升电网灵活性，进而保障电网安全运行和电力可靠供应。

本报告以提升需求侧资源灵活性为切入点，基于需求侧可调节资源实施运行调控的“感 - 传 - 算 - 控”技术路线，设计了需求侧可调节资源参与电网互动的全流程数智化实施路径。报告系统分析了各场景下数智化技术提升需求侧灵活性的创新支撑作用与应用案例。同时，在评价数智化技术应用效果时，报告提出了一系列核心指标，包括响应率、响应速度、经济性、可靠性、用户体验和环境效益，并对宁夏和重庆的虚拟电厂平台建设情况作为数智化提升需求侧灵活性典型案例进行了分析，展示了数智化技术在实际应用中取得的成效。最后，报告指出了数智技术在提升需求侧资源灵活性方面面临的挑战与机遇，并提出了发展建议。

具体来看，分场景的数智化技术应用如下：

对于工业用户，数智化技术可以有效分析各设备提供的数据，进而得出用户用电行为模式，从而得到用户典型用电模式，可以合理规划用电安排，一方面实现能耗管理、节能减排，另一方面实现工业需求侧设备参与电网互动的价值。

对于商业用户，数智化技术可以通过电网调峰平台实现所有参与电网调峰的空调负荷的优化组合，通过刚性调控与柔性调控相结合，以得到理想的空调负荷调峰曲线，从而破解商业负荷参与电网调度中的难点，即处理温度与负荷之间的关系。

对于居民用户，数智化技术可以根据电网调节需求，提前生成诸如电热水器、空调等家用电器的运行曲线，从而实现海量居民设备的规范化互动。

对于电动汽车用户，数智化技术既可以提升电动汽车充电负荷的预测精准度，又可以精准调控储能电池的充放电曲线，从而实现电动汽车与电网的互动调节。

对于 5G 基站和数据中心，数智化技术可以实现智能设备的功耗管理，根据实时负载、结合不同时间尺度和空间尺度的功耗管理技术，实现 5G 基站功耗的最优管理，同时也可增强数据中心与电网的双向互动能力。

背景

1.1 新型电力系统数智技术的发展背景

我国为实现“3060 双碳”目标，正在加快建设新型能源体系和新型电力系统，而数字化智能化道路是必然选择。通过打造数智化坚强电网，可以推动传统电力系统转型升级和高质量发展，并保障电网安全运行和电力可靠供应。

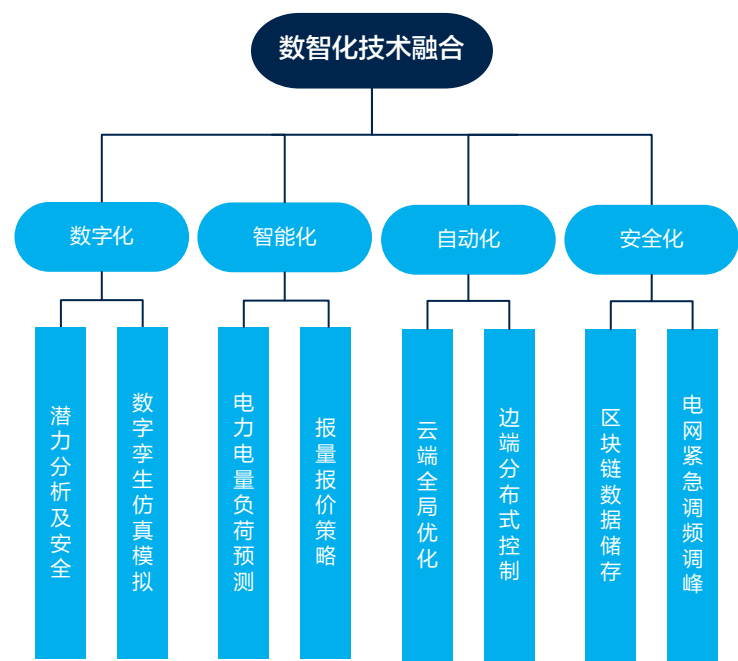
电力系统的运行在需求侧不断涌现出新主体和新形态，包括分布式可再生能源、微电网、电动汽车等大规模接入，这些需求侧资源一方面给电力系统带来挑战，比如导致发用电峰谷期不匹配、凸显可再生能源季节性消纳难题、部分地区弃电与缺电现象交替出现、负荷曲线呈现出“双峰双谷、峰上加峰”等多种极端局势，另一方面也为应对挑战提供了机遇。国家高度重视需求侧资源的作用，2023 年修订的《电力需求侧管理办法》中提出用户侧需求响应目标为最大负荷的 3-5%，2024 年发布的《加快构建新型电力系统行动方案》中提出具备条件的地区响应能力达到最大负荷的 10%。

数智化技术与需求侧资源的深度耦合应用，为提升新型电力系统的智能化和灵活性提供新思路。先进的数据分析、人工智能算法以及物联网技术的应用，不仅能够深入挖掘需求侧的灵活调节潜力，使得电力用户的用电行为以及分布式能源等资源得到精细化管理和高效化利用，从而实现电力供需的高效匹配，推动能源利用效率的不断提升。

1.2 数智化技术融合现实意义

目前部分数字化、智能化和先进通信技术虽然已在需求侧领域开展了典型应用，但是关键挑战在于对用户侧资源的精准感知和高效调用不足，仍面临着电网需求侧资源智能协同软硬件体系不完备，“感 - 传 - 算 - 控”的技术体系仍不健全，难以形成全业务环节的支撑工具体系等多种技术瓶颈。

数智化技术通过运用大数据、云计算、人工智能等前沿科技，能够实现对需求侧资源的实时监测、精准预测和智能调度，从而使其在电力供需平衡、电网稳定运行以及新能源消纳等方面发挥更加积极的作用。这一融合应用不仅有助于优化资源配置，提高能源利用效率，更为构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统提供了强有力的技术支撑和保障。用户侧可调节资源的数智化技术融合，包括提升用户侧可调节资源数字化、智能化、安全化调节能力，这是实现用户侧资源“可观、可测、可调、可控”的核心抓手。技术框架如图 1-1 所示。



数字化方面，推动数据驱动技术深度参与需求侧可调节资源的潜力分析与挖掘。构建数据中台，充分挖掘原有静态属性数据库，并不断导入运行数据，形成动态数据库，基于

大量数据来构建需求侧可调资源负荷特性模型，通过数据聚类分析不同行业 / 企业的避峰、迎峰等特性，获取其可移峰、移时的潜力。

智能化方面，推进先进人工智能与智能决策技术深度参与需求侧灵活性资源负荷预测与报量报价策略。基于人工智能算法，通过对历史负荷数据的深度学习和分析，捕捉到负荷变化的复杂规律，从而实现对未来负荷的精准预测。同时，面向调峰、调频等多元市场需求，基于预测出清电价、博弈论和自适应学习的报量报价策略，引导需求侧可调节负荷资源经济、高效参与电网互动。

自动化方面，融合云边协同、边缘计算技术充分参与需求侧资源调控与灵活性提升。构建海量数据下分布式协同互动调度与运行控制技术体系，实现海量分散资源的灵活快速响应支撑。在云侧，制定动态决策的云侧互动运行策略，促进调峰调频需求下云侧主体间的协作互动与功率支持。在边缘侧，应用边缘计算技术将每个需求侧灵活性资源作为决策参与者，取代传统的中心化决策方案，这样更有利于实现需求侧灵活性资源的合理调控。

安全化方面，要求信息安全、隐私保护等技术参与到需求侧资源参与电网互动的可靠保障中来。通过区块链数据储存技术来拓展数据存储空间、提升数据传输的时效性，以区块链技术为基础对信息存储安全管理系统进行充分改进，进而可以更好地保证需求侧用电安全问题和用户数据安全。

2 需求侧数智化技术融合方案

2.1 需求侧数智化技术的目标

数智化在数据采集方面，要实现的目标包括精准感知、数据共享、数据安全。首先，通过全面感知能力，利用智能电表和传感器实现对配用电环节的实时监控，为电网和负荷聚合商提供了详尽的运行态势图。其次，数据集成与共享机制建立了统一的数据平台，消除信息孤岛，增强了信息透明度和协同效应。云计算和边缘计算技术，使得配用电侧能够快速响应并处理海量数据，提升了互动运行效率和可靠性。同时，兼顾保障数据安全与隐私是数智化的基本原则，通过技术手段和法律政策确保用户数据的保护，增强了用户对数智化“感 - 传 - 算 - 控”系统的信任。

数智化在潜力分析方面，要实现的目标有资源的最优配置、增强电力需求侧系统的适应性、提升需求侧参与电网互动的灵活性和智能性。首先，它通过高级数据分析技术来深化需求侧资源的潜力识别，从而优化资源的高效配置，精准、动态调整供需平衡，并实现从多类型需求侧资源群体的最优调度。其次，数智化技术提升了电力需求侧系统的适应性，使其能够快速响应外部变化，如天气变化或市场波动。最后，它通过实时监控和预测分析来提前采取措施，实现潜力测算的实时动态调整和精准化交易，提高需求侧参与电网互动的灵活性和智能性。

数智化在响应效果评估方面，要实现的目标是需求侧资源参与电网互动效果的精确评估和动态激励，全面提升需求侧参与电网互动的稽核能力。首先，它通过实时数据收集和分析，量化用户的参与程度和节能效果，向电网、负荷聚合商和用户提供反馈，优化需求侧响应策略。同时，通过个性化反馈和激励机制，增强用户参与需求侧管理的积极性，使用户能够根据直观信息和定制化建议，主动调整用电模式。

数智化在需求侧资源聚合方面，要解决的挑战是构建一个高度集成和协同工作的网络，这个网络能够高效地管理和调度分散的需求侧资源，如分布式储能、智能楼宇和虚拟电厂等。通过这种聚合，电网的调节能力和韧性可以得到显著增强，同时提升电网运行的灵活性和响应速度。数智化技术优化了能源调度策略，利用先进的优化算法和人工智能技术自动计算出最佳的电力资源分配方案，不仅考虑了电网的实时运行状态，还兼顾了用户的用电偏好和市场价格信号，以实现经济效益和社会效益的最大化。感知数据融合方法如图 2-1 所示。

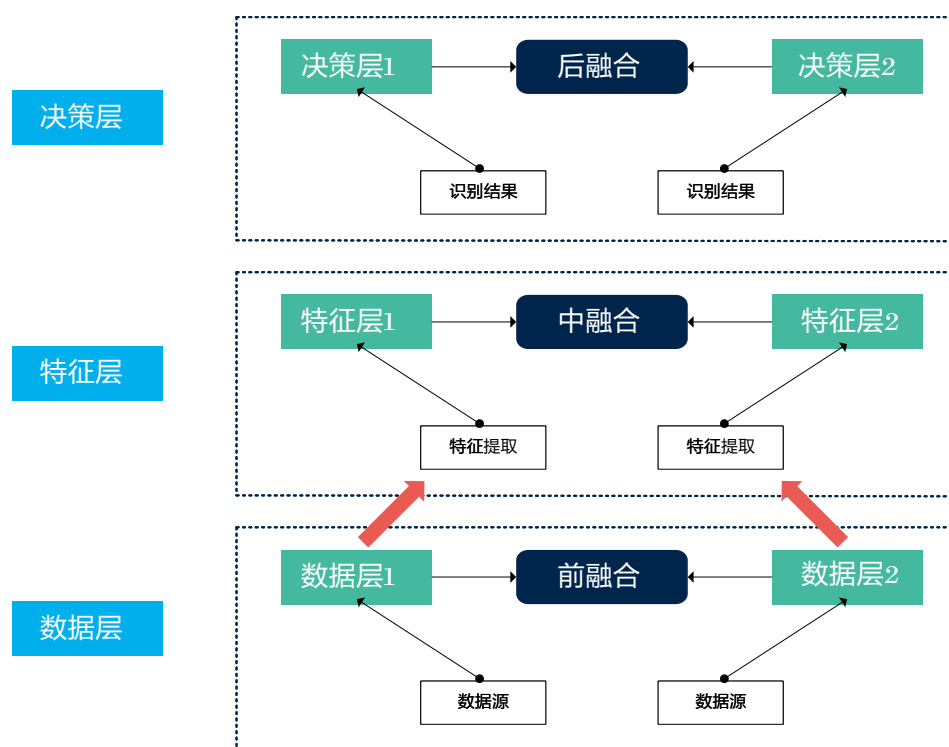


图 2-1 感知数据融合方法

2.2 需求侧数智化技术的实施路径

实施路径方面，总体技术路线为：通过云管边端架构，依托数字孪生的数字物理平台实现对海量灵活性资源的实时控制、感知监测、信息通信、智能决策和网络安全支撑，推动终端可调节资源的实时监测、聚合调控、可信调用。基于需求侧可调节资源实施运行调控的“感 - 传 - 算 - 控”技术路线，设计了需求侧可调节资源参与电网互动的全流程数智化实施路径，如图 2-2 所示。

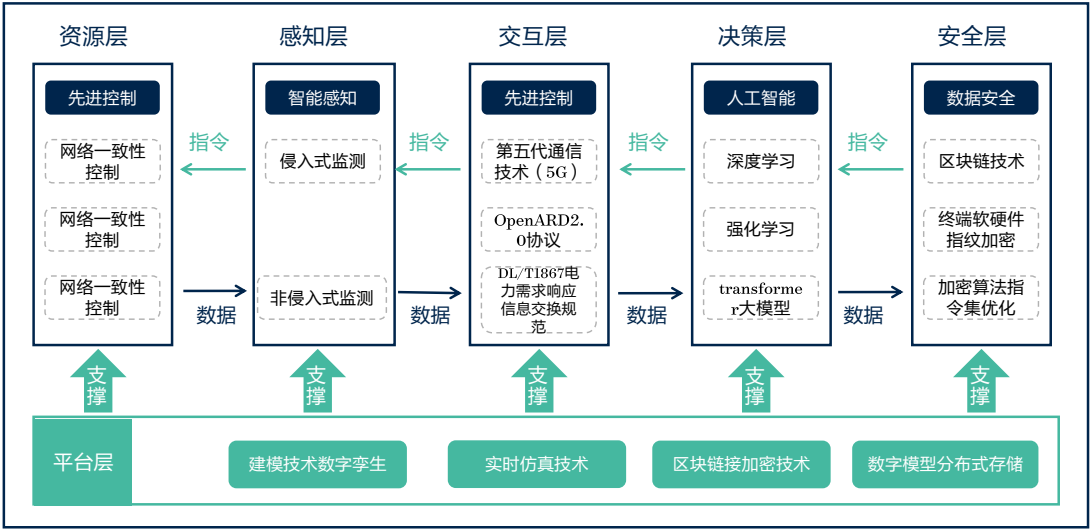


图 2-2 需求侧可调节资源全流程数智化实施路径

资源层和感知层在电力需求侧可调节资源全流程数智化实施路径中扮演重要角色：资源层主要是指在需求侧具备调节能力的各种能源设备、设施或资源，如家庭电力消耗设备、商业和工业设施、储能系统等；感知层则是使用传感器、智能设备等对资源层进行实时监测，获取影响负荷特性的内因和外因数据，为资源层的智能化调节提供数据支持。末端设备级负荷状态感知过程如图 2-3 所示。利用数智化技术，可以构建一个集信息搜集、数据处理、资源调配于一体的数字化平台，实现需求侧资源的可视化管理和远程调度，通过数据分析和人工智能技术的应用，可以更精确地了解需求侧资源的现状和潜在需求，进而对资源进行合理配置，提升服务质量和效率。

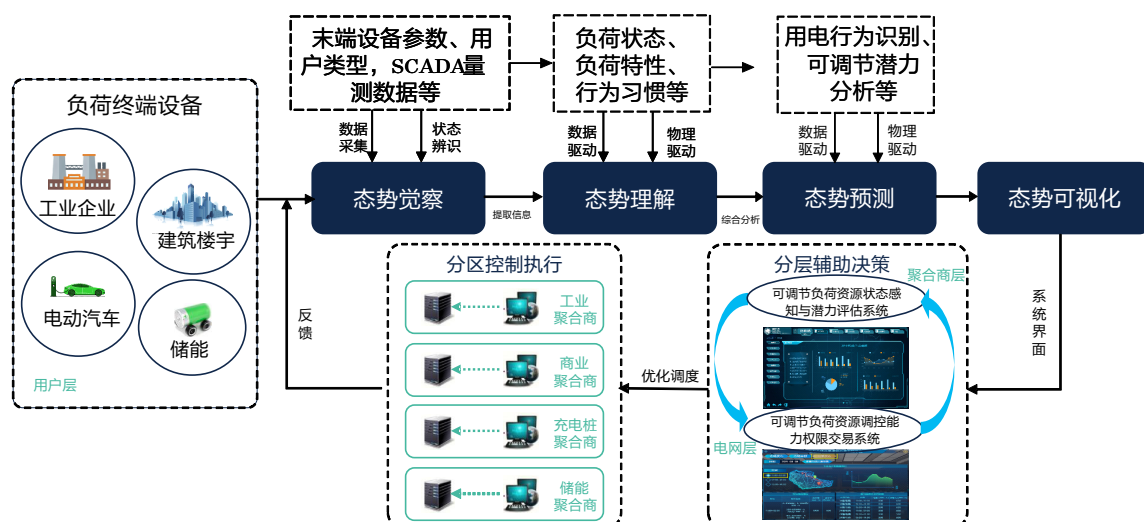


图 2-3 末端设备级负荷状态感知过程

交互层方面，基于海量需求侧灵活性资源的接入，通过采用数智化技术设计灵活的通信接口和标准，以支持不同类型、不同来源的资源接入。确定统一的数据格式标准，以便不同类型、来源的需求侧主体资源数据可以被解析和处理，具体业务上，同时对数据进行规范化、转换、特征提取等操作，为后续分析做准备，设计通用的通信接口，针对不同类型的参与主体（如用户、负荷聚合商、综合能源服务商、电网企业）和业务系统（如虚拟电厂、需求响应、市场交易等）提供访问方式。

决策层方面，人工智能是数智化技术提升需求侧资源灵活性的核心支撑技术，人工智能技术具有应对高维、时变、非线性问题的强优化处理能力和强大的学习能力，可有效解决能源系统面临的各种挑战。电力需求侧资源在参与智能电网以及综合能源系统调控的过程中，会形成结构复杂、设备繁多、技术庞杂的系统。由于人工智能技术对物理本体模型依赖程度低，善于从数据中自学习和对源知识的迁移学习，因此更有助于突破技术瓶颈。图 2-4 为人工智能技术在电力系统和综合能源系统中的应用框架。在大数据的基础上，人工智能技术通过深度学习、强化学习等算法可以提高能源预测、系统规划、用能分析、网络安全等实际应用领域的智能化、数字化能力，大大提高了需求侧资源参与电网互动的精准性和安全性。

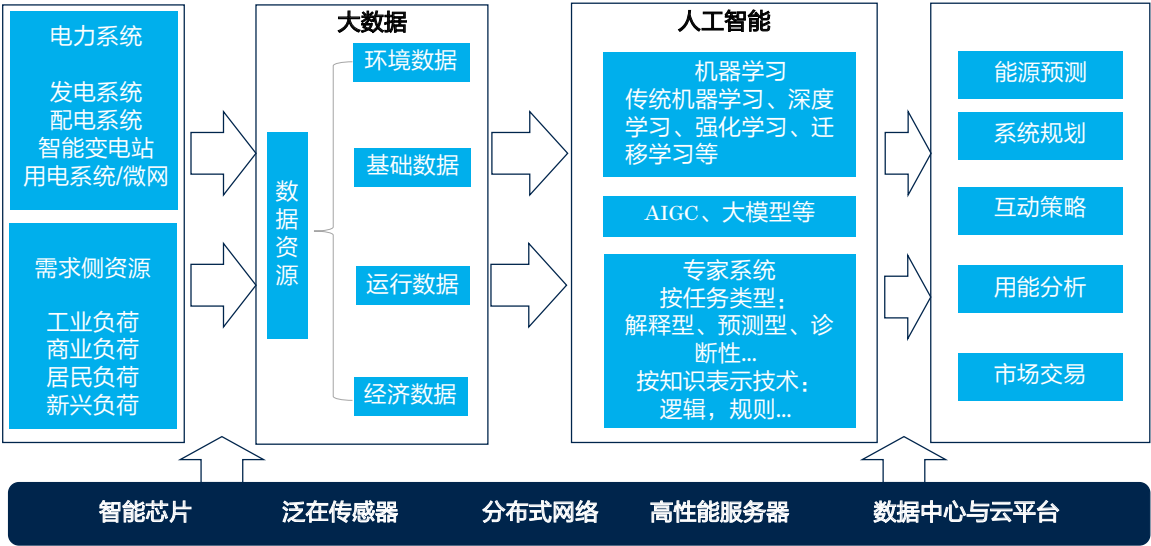


图 2-4 人工智能技术在需求侧灵活性提升中的应用

安全层方面，电力需求侧资源在参与电网互动过程中，会涉及大量用户的用电数据、行为习惯等敏感信息，必须确保这些信息不被非法获取、泄露或滥用。在数据传输过程中，技术上可以采用先进的加密技术对传输数据进行加密处理，如 SSL/TLS 协议等，防止数据在传输过程中被篡改或截获，确保数据在传输过程中的安全性。同时，电网互动系统需要具备强大的防攻击能力，以抵御黑客攻击、病毒入侵等恶意行为，确保系统稳定运行。实施严格的身份认证机制，确保只有授权用户才能访问系统资源。采用基于角色的访问控制（RBAC）策略，对用户的访问权限进行精细化管理。此外，区块链技术因其去中心化、不可篡改等特性，在电力需求侧资源参与电网互动中具有较高的潜在应用价值，可以利用区块链技术实现需求侧资源交互、交易的透明化、可追溯化以及用户隐私的保护。

3 需求侧分场景参与电网互动的数智化方案

目前，可以参与电网互动的需求侧资源主要有工业、商业和居民负荷、用户侧储能和电动汽车等。随着人工智能技术的发展和成熟以及对需求侧资源的长期探索和管理，数智化技术在解决需求侧资源的数据采集、潜力分析、响应效果评估、资源聚合等方面逐渐成为电网负荷调控的重要手段。本章将分别介绍工业、商业、居民、电动汽车、5G基站等需求侧场景参与电网互动的数智化案例。

3.1 工业用户参与电网互动

工业用户一般表现为复杂的能源系统，包含多种能源形式，涉及多种能源的生产、传输和利用。工业能源的多样性为多能源容量配置提出了更高的要求。同时，由于其负荷需求大、负荷特性复杂、不同能源的耦合与供电可靠性要求高，对需求侧资源的运行调度带来了新的挑战。在具体实践中，工业互联网云平台集合了大量设备、数据和资源，为电力用户和电网企业提供了海量数据资源，如图 3-1 所示。同时，云平台可以及时监控设备运行状态，对设备预测性分析和调度，为实现需求响应、辅助服务、新能源消纳等业务提供了极大便利。通过对各设备提供的数据进行用户用电行为分析，得到用户典型用电模式，合理规划用电安排，实现能耗管理、节能减排。通过平台资源管理和部署，实现了设备、资源、运维的多维管理和工业需求侧设备参与电网互动的价值。



图 3-1 工业用户需求响应系统拓扑图

在工业用户参与电网互动方面，在甘肃兰州地区选择铁合金、碳化硅类型工业企业作为案例，开展了典型企业可调资源的调研分析及应用等工作，实现了 2MW 可调节能力。本案例是国内首次新型智慧能源单元全业务功能在高耗能大工业企业的先行示范，为典型工业企业可调节负荷参与电网互动能力建设提供了“样板间”，打造适用于高耗能企业的“一站式”综合能源服务业务模式。案例解决了当前工业负荷参与电网互动主要靠生产线启停的模式单一的问题，率先开展了设备级、工艺工序级的细颗粒度尝试，提高了甘肃电网大工业企业参与需求响应的控制能力，提升了互动调节能力的运营水平。

该案例借助数智化技术，在实施路径方面如 2.2 节所述的总体技术路线，以分布式主从多站协同设计理念构建，整体上为多类型异构处理器及应用构成的智能化软硬件系统，如图 3-2 所示。通过在用户侧的用户管控中心安装新型智慧能源单元及其配套设备，上行可与电力负荷管理系统、电力调度系统、需求响应服务（聚合）系统等主站系统进行互动，下行能与各种能源测控终端（或系统）进行通信，用于用能数据的采集、计算、分析、报送以及业务事件的接收与策略运行等，在为用户提供本地用能优化能力实现节能减碳的同时，可与上层系统互动实现用户侧设备的智能策略控制、事件推送、需求响应、安全用电、无功管理等业务功能。案例中使用的新型智慧能源单元及其配套设备依托数智化手段，结合云边协同和人工智能技术对多源数据进行深度学习，整合协同多边缘设备，实现了大量

终端的快速实时监测、智能运维和资源优化调度的目标；实现了构建一个集信息搜集、数据处理、数据互通、网络互联、资源调配多功能于一体的智能设备的目标。

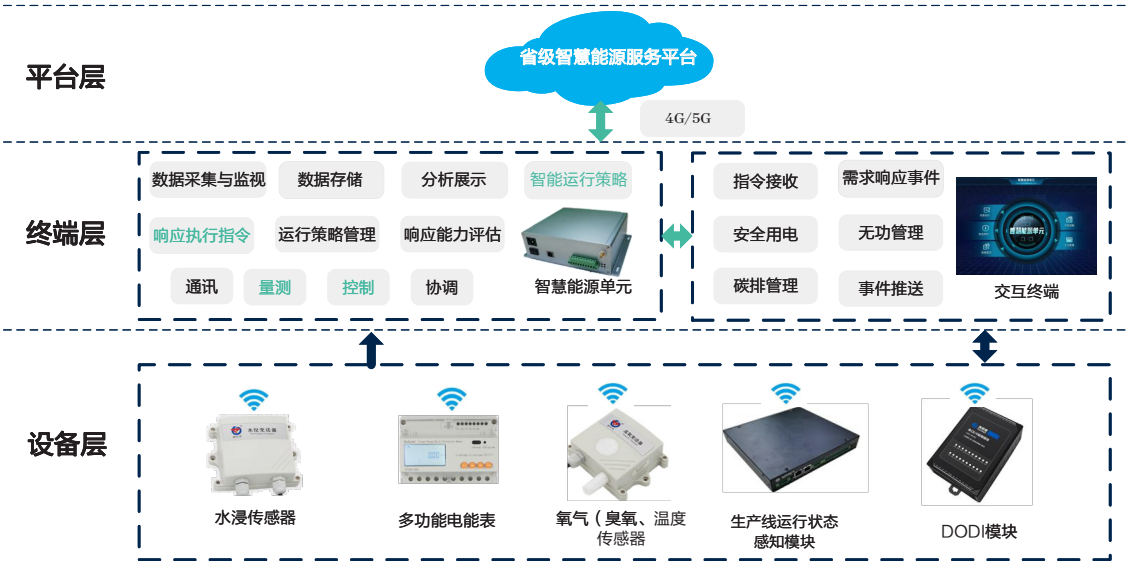


图 3-2 工业侧需求响应工程架构

3.2 商业用户参与电网互动

商业电力负荷主要是指商业建筑内各种用电设备电力负荷的总和。商业建筑按功能分类主要包括：商场、办公楼、酒店等十余种功能类型。与系统负荷相比，商业负荷组成单一，主要负荷包括：空调、照明、电梯等。造成商业负荷不稳定的原因有很多：天气变化的影响、节假日的影响、重大社会活动和突发事件的影响。目前商业负荷潜力预测主要考虑天气变化的影响，包括气温、降水、湿度、风力等因素。温度剧烈变化时，易造成负荷水平的变化；温度相对平稳时，负荷变化也较为平稳。如何处理温度与负荷之间的关系是商业负荷参与电网调度中的重点和难点。商业用户主要通过调控空调负荷参与电网互动。图 3-3 是楼宇空调负荷参与电网调峰总体架构。电网侧主站层管辖所有参与电网调峰的用户侧空调负荷，其核心功能是实现所有参与电网调峰空调负荷的优化组合，通过刚性调控与柔性调控相结合，以得到理想的空调负荷调峰曲线。

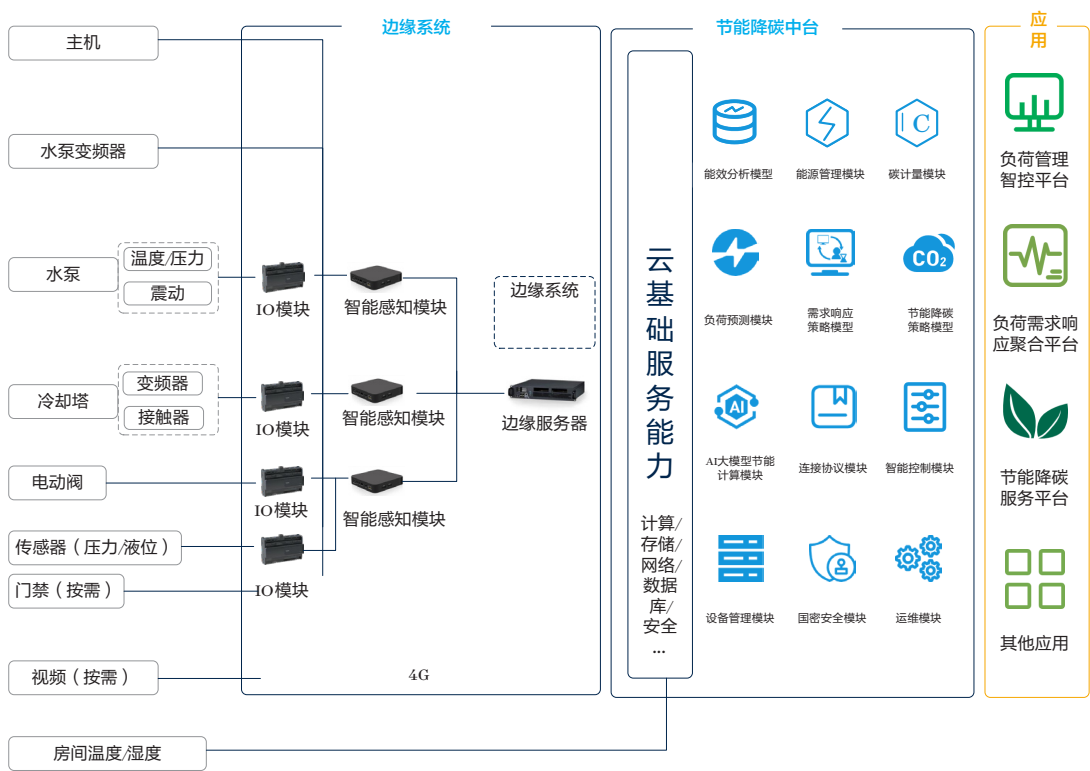


图 3-3 楼宇空调负荷参与电网调峰总体架构

具体技术流程为在需求侧利用人工智能算法清洗和分析空调负荷数据，构建天气条件与电力负荷的耦合模型，解决负荷评估和预测难题，提出多类型空调的聚合调控策略。建立多层级、分布式的调控体系，通过政策－价格联动机制实现精准调控，确保数据安全，开发兼容主流空调的调控设备，并通过智能自动控制策略优化运行，达到节能降碳的效果。

以福建省福州市选取爱琴海购物中心为例，利用数智化技术进行中央空调负荷调控，总体实施路径是：将空调机房视为整体，在保证用户末端温度不变的条件下，通过人工智能技术来分析空调负荷的数据，采用智能调峰策略，将用电高峰期的用电负荷移至其他时段，并保证机组、泵冷却塔稳定运行，用户体验不变，可调负荷占空调机房总负荷40%-60%。

本案例在保障了末端温度稳定的前提下，空调机房调峰1小时，中央空调负荷平均压降近50%，最大可调负荷达到中央空调系统总负荷的80%，电网关口负荷下降率达到

20% 以上，该案例依托数智化技术和新型电力负荷管理系统，实现空调设备运行数据的实时监测，在不影响用户体感舒适的前提下，采用人工智能策略调节空调运行负荷，削减高峰时段的用电负荷，实现了商业负荷的无感调峰、自动控制和节能降费的目标。

3.3 居民用户参与电网互动

居民用户用电负荷的用电容量小、种类多，其用能设备包括照明设备（灯具等）、温控设备（空调、电热水器等）、通信和娱乐设备（手机、电脑、电视等）和其他家用电器（电饭煲、吸尘器等）。根据用能特性，这些负荷又可以分为刚性负荷、柔性负荷（如变频空调，在不影响舒适度的前提下可以连续调节功率）和可转移负荷（如洗衣机，可以平移用能区间）。大多居民用户不具备有效的能量管理系统，其用能主要取决于用户个人行为，其中照明设备和温控设备用能又与气象环境因素强耦合。

在居民用户侧，以电力耗能设备如电热水器、空调为主要参与电网互动的设备，CPS（赛博物理系统，用于提高生产效率、降低生产成本，实现生产过程的智能化管理）化后的电热水器作为终端智能设备，将具有灵活的网络连接能力，同时还配备温度传感器等用于感知外界系统的传感设备。从用户体验角度看，电热水器可以根据感知的室外温度自动计算合适的水温；从能耗优化的角度看，电热水器可以根据用户的历史用水信息，给出兼顾节能与体验的水加热时间曲线。

空调方面，以面向多类型经典电网互动场景为目标，实现家用空调参与电网互动，如图 3-4 所示。首先，采用聚类分析方法进行多类型电网互动场景下的空调使用模式和能耗模式的挖掘；然后，采用机器学习算法对空调用户的调节行为进行建模，形成与空调功率变化相关联的方法分析；最后，对气候变量与空调功率进行回归分析，研究不同室外温度条件下空调功率随之变化的敏感性。

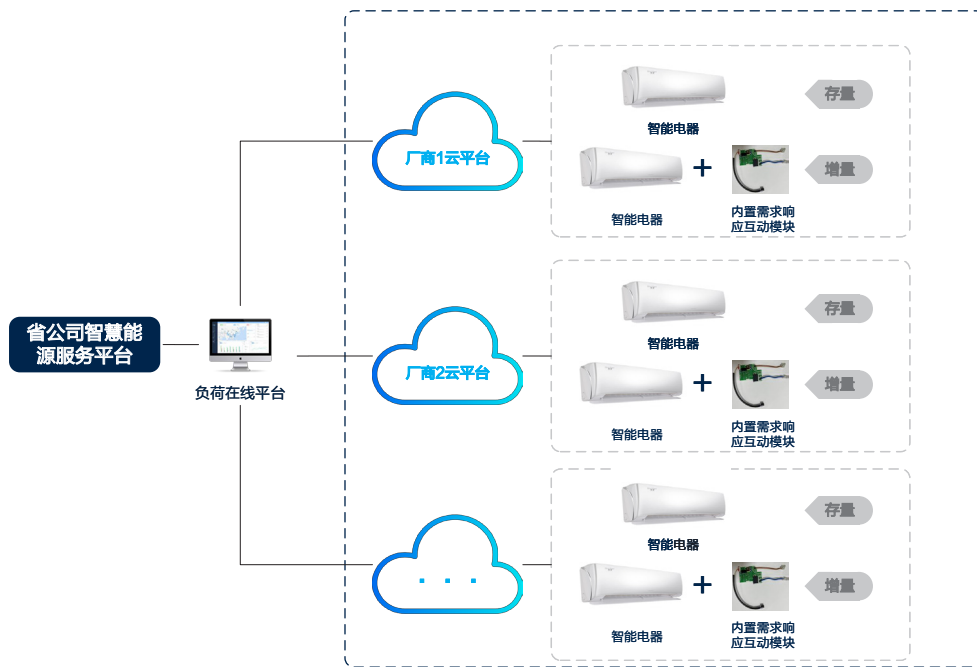


图 3-4 家用空调设备参与电网互动

居民用户参与电网互动方面，以上海市居民智能用电负荷聚合能力建设项目为例，案例利用数智化技术，总体实施路径是：通过建设负荷在线平台，与省公司电力需求响应管理平台和家电厂商云平台对接，推动形成居民负荷在线分析；借助电力需求响应互动政策和家电厂商的用户运营能力，吸引各类社会资源，设计居民用户参与电网需求响应的模式，充分调动居民用户参与电网需求响应的积极性和主动性；从互联网侧接入海量居民家电负荷，进而起到规模化的聚合效应；同时，还可对电器设备进行升级，通过与主流家电厂商合作，共同研发内置集成需求响应互动模块的“碳中和”电器，使其具备分钟级的用电数据采集能力，可有效支撑居民智能用电负荷聚合能力分析建设，总体架构图见 3-5。

该案例开展了对居民智能用电负荷聚合能力的分析，研制出适用于居民智能家电需求响应的互动模块。该模块具备数据采集、计量、通信、需求响应互动等多种功能，实现了家电设备负荷的可监测、可调节、可评估功能，实现了居民用电负荷智能调度的功能。根据综合典型居民用户负荷数据分析，居民用户的总体可调节负荷潜力约为用电负荷的 50%，提升了居民用户与电网互动的灵活性和智能性。

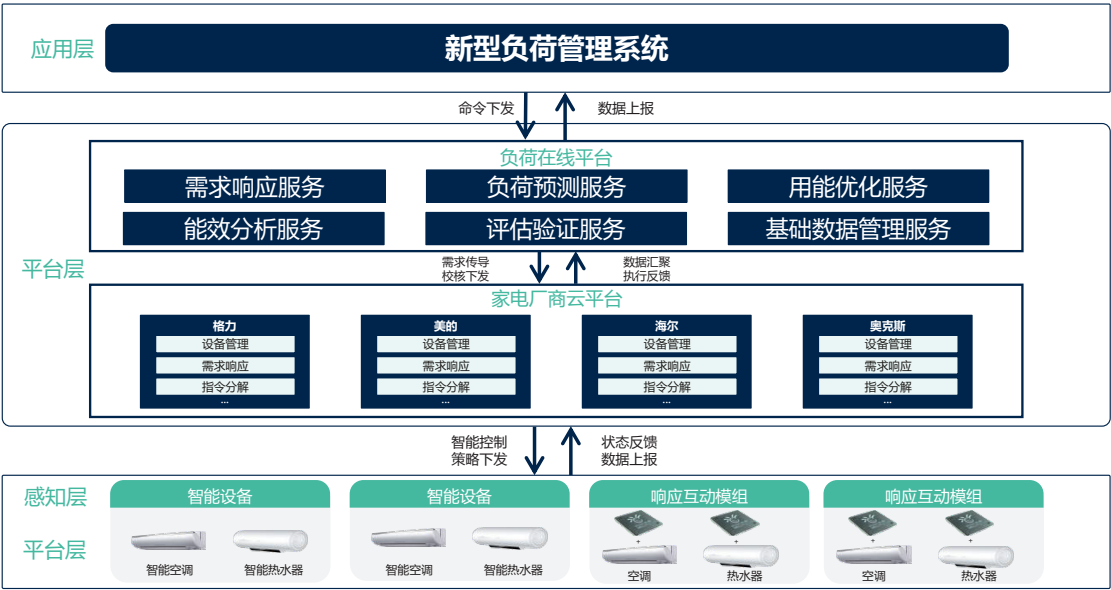


图 3-5 负荷在线平台总体架构图

3.4 电动汽车参与电网互动

电动汽车参与电网互动主要通过智能有序充电、双向充放电、削峰填谷、调频服务以及备用服务的方式。电动汽车作为大功率用电负荷，接入电网具有广泛性和随机性，对电网带来极大的冲击，给电网负荷预测、安全稳定运行带来新的挑战；另一方面电动汽车作为灵活分散的储能设备，如果调控得当，可以为电网提供紧急功率支撑，对平抑电网波动和接纳间歇式新能源具有积极意义。

电动汽车参与电网互动面临诸多挑战。首先，在影响因素方面，影响因素的精准辨识直接影响预测结果的准确性，电动汽车充电行为受多种因素的影响，现行电动汽车充电负荷预测局限于常规情况下的预测，主要利用历史负荷、气象条件、节假日、交通状况等因素进行建模，对极端天气和转折天气等预测误差较大，影响预测精度的提升。其次，在时空相关性方面。由于电动汽车用户的充电行为存在时间和空间的规律性使充电负荷具有时间周期性和空间相关性，未来研究中融合交通路网、天气温度、充电站、电网等多源信息，同时考虑用户决策的随机性，是提高预测精度的重中之重。

电动汽车参与电网互动时，面对这些挑战，主要以借助 V2G 技术将电动汽车的电能安全输送给电力系统，如图 3-6 所示。V2G 模式下电动汽车电池将作为储能单元，当其电量低于电网负荷时，借助电网能量流动，为电动汽车补充电量，促进其安全稳定运行。

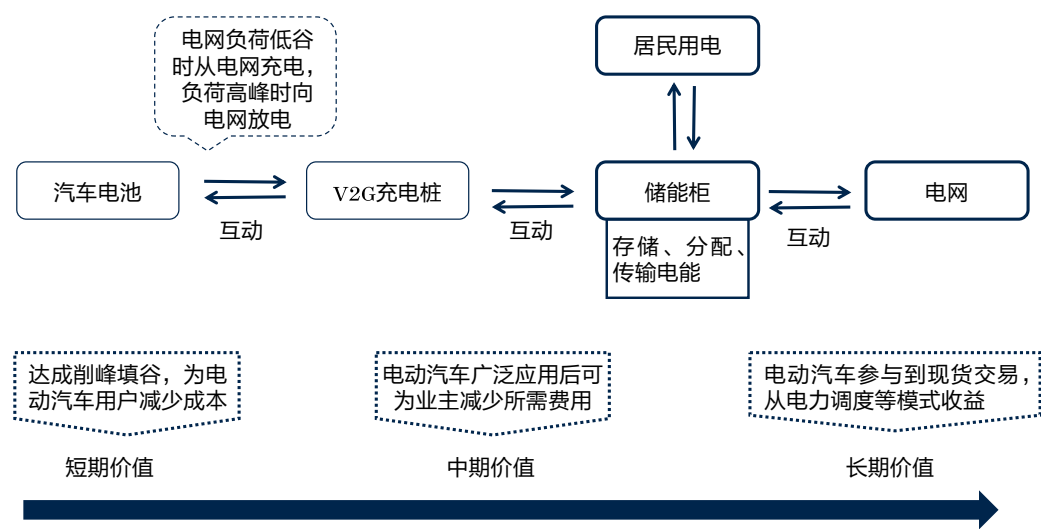


图 3-6 V2G 技术下的充放电流程图

电动汽车快充电站的充储一体虚拟电厂是典型的应用案例。某电动汽车充储一体项目，通过数智化技术的应用，能够实时监控电动汽车的电能和预测分析，提前采取措施，实现 V2G 模式的实时动态调整和精准化交易，提高电动汽车参与电网互动的灵活性和智能性。在网供充裕时对储能蓄电池组进行充电，参与电网消纳绿色能源；网供不足时，停止对储能蓄电池充电，降低充电站负荷，储能蓄电池组放电对电动汽车充电，不影响充电站运营；特殊情况下，调整充电装置运行模式，对电网释放电能，参与电网调节，实现虚拟微电厂功能，为未来电动汽车快速充电技术的实现做好电网供能准备。本项目的两个优势如下：

- （1）充电站改造时，充分利用现有设备，技术改造量少，实施方便，提升了现有设备的利用率和低谷电的价值；对比独立储能电站提高了所储存电能的价格差优势，更具经济性。若和储能电池厂家合作建设，将进一步降低电站的投入，并提高电池的安全运行寿命。
- （2）充电站在相对大的区域聚合众多该类虚拟电厂参与电网对新能源的消纳及辅助调节服务，是一种相对稳定可靠的调节容量，既利于电网运行又为充电站带来较高的额外收益，随着储能技术的提升及储能充电站数量的增加，其对电网的平衡调节作用和充电站运营的经济性进一步提升。

本项目基于电动汽车快充电站的充储一体虚拟电厂实施运行调控的“感-传-算-控”技术路线，设计了电动汽车快充电站参与电网互动的全流程数智化实施路径。在数智化技术的目标方面，实现了对电动汽车快充电站负荷数据的精准感知、数据共享、数据安全的目标；在潜力分析上，实现了电动汽车快充电站与电网之间资源的最优配置、增强电动汽车快充电站的适应性、提升电动汽车快充电站参与电网互动的灵活性和智能性的目标；在需求侧资源聚合方面，依托数智化技术，实现了能够高效地管理和调度分散的需求侧资源的目标，本案例通过聚合电动汽车资源以虚拟电厂、广义储能聚合体等形态参与电网互动，电网的调节能力和韧性可以得到显著增强。

3.5 5G 基站和数据中心参与电网互动

（1）5G 基站参与电网互动

5G 基站参与电网需求响应，首先要考虑基站的通信负荷特性，为基站的通信提供备用电源的前提下参与电网需求响应，而且单个 5G 基站的电池容量较小，必须要对 5G 基站的电池通过聚合后统筹规划充放电策略。分布广泛的 5G 基站的储能资源具有时间灵活性和空间灵活性，可以灵活性地接受电网的调度，同时 5G 基站电池也可以作为一种特殊的负荷，在电力需求低峰时段将新能源（风电、光伏等）生产的电力储存到 5G 基站电池中，再在需求高峰时释放，从而减少对电网的压力，提高新能源的消纳率。

5G 基站参与电力系统需求响应面临的技术挑战主要包括智能设备功耗管理、储能电池能量管理、储能电池可调度容量刻画与预测、5G 基站聚合与协同调度等。智能设备功耗管理是 5G 基站参与电力系统需求响应的前提之一，需进一步研究如何根据实时负载，结合不同时间尺度和空间尺度的功耗管理技术，实现 5G 基站功耗的最优管理。5G 基站参与电力系统需求响应需要通过储能电池能量管理频繁调度电池进行充放。在信息通信行业大量使用二次利用的退役动力电池作为备用电源的情况下，电池不一致性问题还须得以解决。

目前，5G 基站应用数智化技术的典型案例是对基站储能电池全过程充放电的远程调控。用户依托综合能源管理平台实施精细化管理，通过制定储能系统的多类型、多时空尺度充放电策略，并根据实际应用场景进行策略优选排序。

下一步，可以通过数字化手段建立 5G 基站储能电池模型，并将配电网中零散的 5G 基站聚合成 5G 基站 VPP，研究其参与电网互动的可调度容量和调度成本等问题。在此基础上建立综合考虑 5G 基站 VPP 参与电能量市场和调频辅助服务市场的双层决策模型，如图 3-7 所示，设置相应的目标函数，进行电能量 - 调频辅助服务市场联合出清，并利用运筹优化理论进行求解，得到 5G 基站 VPP 参与电力市场的最优策略。

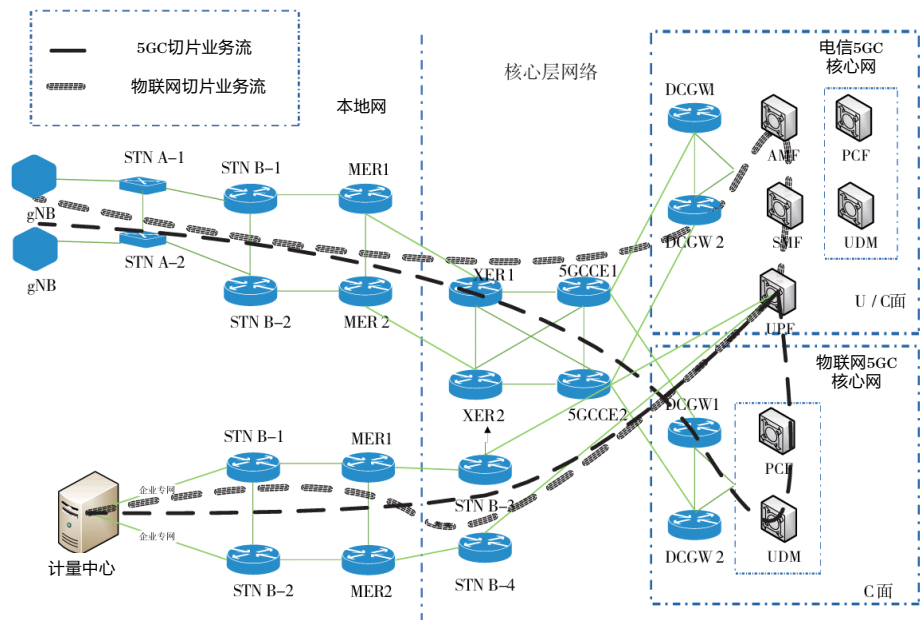


图 3-7 5G 网络的实时响应通信架构

(2) 数据中心参与电网互动

数据中心较强的用电灵活性、逐年攀升的用电占比和高度互联、实时监控的运行调度系统，使其有望成为电力系统内高水平管理需求侧资源的重要载体，为其自身和电网运行带来前所未有的机遇和挑战。

目前，数据中心建设呈现出单位功率占地面积不断降低、平面设计多元创新的趋势，使得供电技术由分散设备向一体化的方式演进，让预制化供配电系统成为新潮流。智能化的发展会成为数据中心供配电的一大差异化能力。AI 智能技术的加持，让数据中心供配

电不仅在管理层面实现统一监控和管理，还能充分利用智能技术实现故障预警和健康度评估，大幅提升整个供配电系统的安全性和可靠性。

数据中心参与电网互动的主要方式有需求响应，双向充放电和数据流共享。数据中心参与电网互动具有显著的特点，它们不仅拥有大规模的电力需求和储能能力，而且能够快速响应电网的需求变化。通过智能化管理系统实时监控和优化互动过程，数据中心的双向互动能力使其既可以从电网获取电能，也可以在电网需要时向电网提供电能，这种互动性使得数据中心能够作为虚拟电厂的一部分，提供更广泛的调节服务。此外，数据中心可以与可再生能源如风电、太阳能等集成，提高电网对绿色能源的利用效率，同时在参与电网互动时考虑经济性，通过提供需求响应服务或出售储能服务获得经济收益。

数据中心与电网的互动仍处于研究阶段。研究显示，数据中心内部在工作负载调度、服务器用电管理，以及制冷系统、储能系统、备用柴油发电机等运行管理等环节蕴含了巨大的灵活运行潜力，内部各系统的运行灵活性聚合成数据中心用电负荷的时空灵活性，在价格信号的引导下进行数据中心电力负荷的时空转移，能够为电力系统的运行优化创造更大的可调空间。整体架构如图 3-8 所示。

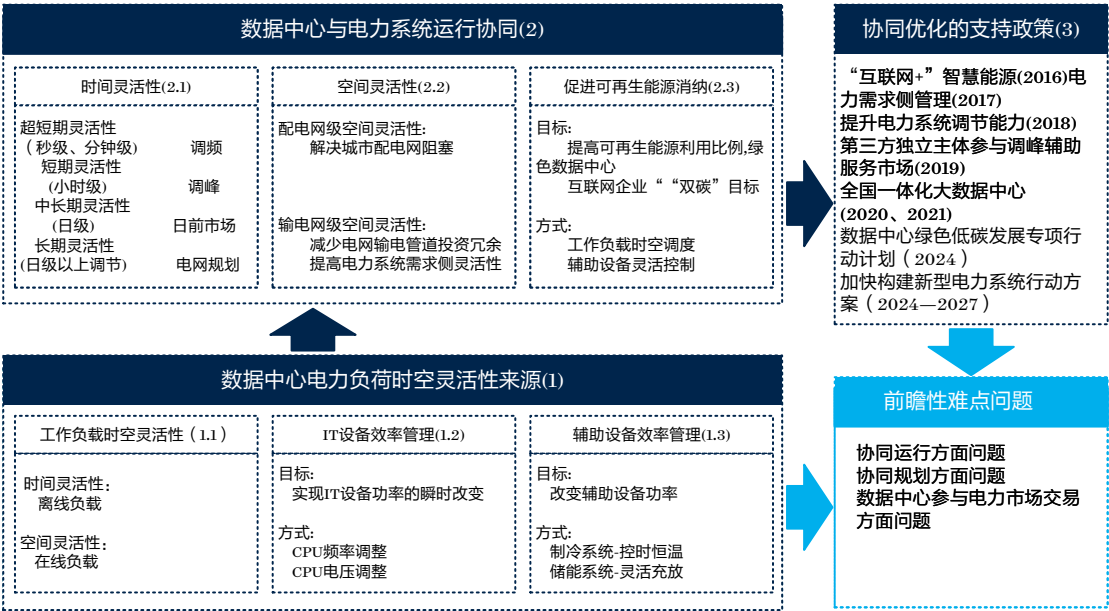


图 3-8 数据中心需求响应研究整体架构图

4 需求侧数智化的评价指标与应用案例

需求侧数智化评价指标体系旨在帮助企业更好地理解和实施数智化策略，从而提高管理效率和优化业务模式，以适应时代的需求和挑战，这一指标体系主要关注于评估需求侧通过数智化手段进行管理和优化的效果，既涵盖了技术应用的广度和深度，也包括了用户体验和环境效益，为评估和提升数智化水平提供了具体的衡量标准。本章将具体介绍需求侧数智化评价指标体系及应用案例。

4.1 需求侧数智化评价指标体系

电力需求侧资源数智化评价指标体系通过一系列指标，对电力需求侧资源的智能化、数字化水平进行量化评估。其目的在于推动电力需求侧资源管理的数智化转型，有效唤醒和高效利用蕴藏在需求侧的平衡调节资源，提升新型电力系统用户侧的灵活性和承载力。评价数智化技术在需求侧响应的应用效果时，通常需要关注以下几个核心指标，具体如图 4-1 所示：

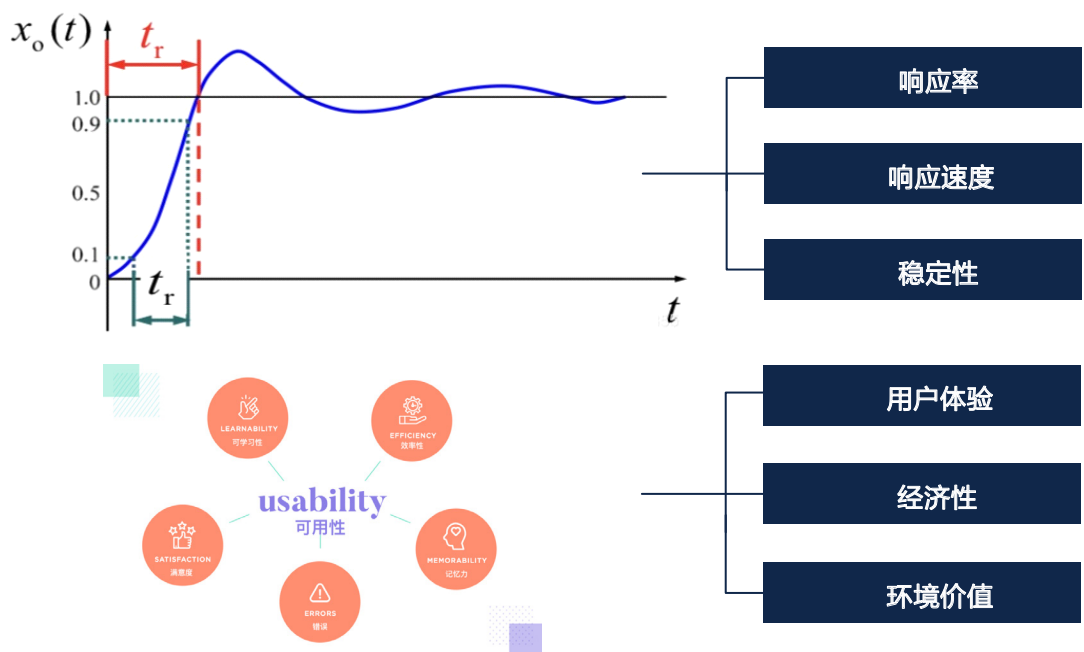


图 4-1 数智化技术应用效果评价指标

- (1) 响应率：这是衡量需求响应项目成功与否的基础指标，即参与需求响应的用户或负荷在接收到响应指令后，实际削减或增加的电量占总响应电量的比例。响应率越高，表明需求侧管理的效果越明显。
- (2) 响应速度：它体现了数智化系统执行需求响应命令的敏捷性，即从需求响应信号发出到用户实际调整负荷所需的时间。响应速度快，有助于更及时地平衡电网供需关系。
- (3) 经济性：在经济层面上，数智化技术助力需求侧响应不仅能节省用户电费支出，还可通过参与电网服务获取补贴收益，因此，经济效益是评价系统效能的重要标准。
- (4) 可靠性：数智化系统在进行需求响应时，必须具备较高的连续运行能力和故障恢复能力，以确保在应对各种复杂工况时仍能保持稳定高效的运行状态。
- (5) 用户体验：良好的用户体验是推广需求响应策略的关键因素之一。数智化技术应当在有效实施需求响应的同时，最大限度地减少对用户生活或生产活动的影响，保障舒适度和便利性。

（6）环境效益：通过数智化技术引导和调控用电需求，可以有效降低电网在高峰时段的发电压力，增加清洁能源的消纳比例，进而产生显著的节能减排效果。通过量化这些环境效益，我们可以全面评估数智化技术在需求侧响应领域的社会效益。数智化技术指标评价体系构建方法如图 4-2 所示。

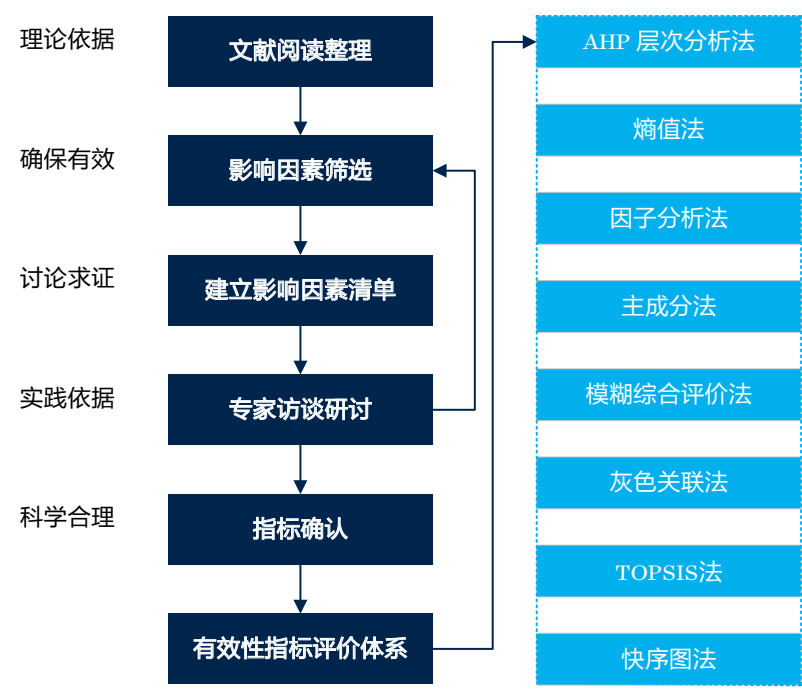


图 4-2 数智化技术指标评价体系构建方法

4.2 送端电网的虚拟电厂平台数智化改造实践—宁夏案例

宁夏是我国首个新能源综合示范区，风光资源丰富。截至 2023 年底，宁夏新能源装机超 3600 万千瓦、占比 54.4%。宁夏新能源中光伏占比较高，使得“白天大发富余，晚上无光缺电”，造成宁夏晚峰电力保供压力较大。

面对新能源快速增长带来的挑战，宁夏近年来出台系列政策鼓励储能产业发展，提高电网稳定性。目前，宁夏已并网储能电站 37 座，并网总容量达 356 万千瓦，最大充电电力 306 万千瓦，预计可提升宁夏 2024 年新能源利用率约 2.8 个百分点，提供最大顶峰能力 331 万千瓦，相当于 11 台 30 万千瓦火电机组。

宁夏电网在数智化技术应用方面，利用云管边端等技术，实现虚拟电厂聚合资源协调优化。边端的作用，实现对用户负荷的监视、控制和引导。管理端是聚合运营系统，具备资源聚合管理、运营管理、市场交易等相关功能，支撑虚拟电厂参与需求响应、辅助服务及电能市场交易。云端是虚拟电厂管理平台，面向全区所有虚拟电厂提供市场资讯、数据报送、申报代理等公共服务，同时能够及时掌握虚拟电厂的运行概况和建设规模，实现对虚拟电厂的统一注册、统一管理、统一调用。宁夏通过云管边端全链路的搭建，需求侧资源参与电网互动的响应率得到显著提升 15% 以上，响应速度从分钟级提升到秒级。通过数智化技术聚合需求侧灵活资源建设虚拟电厂聚合运营系统试点，参与多类型市场，探索以市场化路径，实现电力系统实时平衡和安全保供能力提升，打造支持参与“需求响应 - 辅助服务 - 电能”全市场类型的虚拟电厂典型示范。宁夏虚拟电厂管理平台管理界面如图 4-3。



图 4-3 宁夏虚拟电厂管理平台管理界面

按照虚拟电厂发展目标将虚拟电厂平台建设运营分为三个阶段：

2022 年 9 月，宁夏自治区提出“加快虚拟电厂系统建设，有效提升电网调节能力”。宁夏公司第一时间落实部署，开展宁夏虚拟电厂顶层设计并编制建设方案。

2023年9月，宁夏虚拟电厂运营管理平台上线运营，向全社会公开提供虚拟电厂接入服务。10月，宁夏第一个虚拟电厂—宁夏综能公司正式参与辅助服务市场，标志虚拟电厂常态化市场运营取得实质性突破。

2023年12月，5家虚拟电厂通过自治区资质认定，开启了虚拟电厂深度参与宁夏电网调节的新局面。截至目前，宁夏虚拟电厂管理平台已接入7家虚拟电厂，涉及行业类型15类，代理用户共479户，聚合资源可调容量203.59万千瓦，上调能力92.58万千瓦，下调能力172.59万千瓦。

目前参与市场的资源类型主要为材料生产及制造等工业负荷，运行以来累计参与辅助服务调峰54次，响应电量1604.56万千瓦时，补贴总额304.87万元；参与需求响应削峰6次，响应电量295.2万千瓦时。宁夏虚拟电厂的建设对电力系统的安全稳定运行，尤其是新能源的消纳起到了关键的作用。

4.3 受端电网的虚拟电厂平台数智化改造实践—重庆案例

重庆电网负荷季节性和峰谷特征明显，夏季极端高温天气下，最大降温负荷占用电负荷比重超过50%；冬季取暖负荷上升明显，最大取暖负荷占用电负荷比重接近40%。受用电结构影响，重庆电网平均峰谷差率在35%左右，最大峰谷差率在50%左右，高于全国平均水平，电网调峰较为困难。

重庆虚拟电厂以“总体设计、分步实施、试点推进”为建设原则，构建“1+N”虚拟电厂建设运营服务体系，即1个虚拟电厂运营服务平台、N个虚拟电厂聚合运营平台，依托新型电力负荷管理系统建设重庆市虚拟电厂运营服务平台，对内贯通交易、调度业务数据，对外统一为运营商提供资源接入、能力校核、市场交易等服务。通过促进“源网荷储”协同互动，进一步保障电力安全可靠供应，提升新能源消纳水平。

在数智化技术应用方面，重庆案例在实施路径上符合2.2节提到的总体技术路线：在边缘侧应用嵌入5G模组的可调节负荷互动响应终端，实现海量分布式资源高效接入调控策略，使其具备快速下发和并发处理的能力；在云侧应用“多级协调、逐步细化”的多时间尺度柔性负荷调控策略，实现海量可调负荷高效接入分布式资源，使其具备精准、可靠、

柔性调节的能力，实施了运行调控的“感 - 传 - 算 - 控”技术路线。解决了用户可调负荷响应精确性问题，响应时延从秒级降低为毫秒级实时控制；解决了调控策略和调控模式单一问题，调节方式从只有启停刚性调节转变为分层级多时间尺度柔性调节。实现了资源的最优配置、增强电力需求侧系统的适应性、提升需求侧参与电网互动的灵活性和智能性的目标。案例所用虚拟电厂管理平台管理界面如图 4-4。



图 4-4 明德绿能云虚拟电厂管理平台管理界面

按照虚拟电厂发展目标将虚拟电厂平台建设运营分为三个阶段：

2024 年 6 月 30 日前，编制印发重庆市虚拟电厂建设运营管理方案、细则及配套政策。按照政策要求初步建成重庆市虚拟电厂运营服务平台，具备虚拟电厂总览、聚合资源总览、平台接入、聚合用户管理、能力校核、交易执行与结算等功能，满足虚拟电厂参与需求响应全流程服务。

2024 年 7 月 15 日前，至少向 6 家虚拟电厂运营商开放虚拟电厂运营服务平台访问权限，邀请试用注册、聚合用户接入、分路量测装置安装等功能。

2024 年 7 月 15 日至 12 月 31 日，正式上线虚拟电厂参与需求响应全流程功能，正式开展聚合用户接入、需求响应能力校核、需求响应执行与结算功能，同步开展虚拟电厂参与电力现货短周期结算试运行的功能建设。

目前，重庆市虚拟电厂成为西南地区首个上线运行的省级虚拟电厂，也是目前西南地区接入虚拟电厂聚合商最多的省级虚拟电厂。现已建成全市统一的虚拟电厂运营服务平台，累计注册重庆电动、明德绿能云、汇智能源、清安储能、三峡水利、中广核等虚拟电厂运营商 13 家，其中 5 家虚拟电厂完成能力校核并签订需求响应协议，聚合用户 6.8 万户，需求响应校核能力 8.8 万千瓦。成为西南地区接入虚拟电厂聚合商最多的省级虚拟电厂平台，也是西南地区首个上线运行的省级虚拟电厂平台。

5 数智技术提升需求侧资源灵活性面临的挑战与建议

5.1 研究发现

数智化技术在挖掘需求侧资源潜力方面作用巨大，终端领域都将从数智化技术中获益。

首先，从家居层面看，智能电网与智能家居的融合是数智化技术应用于需求侧响应的重要场景。智能电表和各类物联网设备实时采集用户的用电数据，借助 AI 和大数据分析技术，系统能够精确预测并优化家庭用电模式。例如，在电价高峰期，智能系统可以自动调整空调温度、延迟洗衣机或热水器等非紧急电器的工作时间，从而降低尖峰时段的电力需求，实现精细化的家庭需求侧管理。

其次，工业领域同样受益于数智化技术在需求侧响应的应用。现代工厂普遍引入了先进的生产管理系统和数据分析工具，能够实时监测和调整各生产环节的能耗情况。在保证生产流程不被打乱的前提下，工厂可以根据电网发出的需求响应信号，灵活调度高耗能设备的运行时段，平滑工业负荷曲线，为电网平稳运行提供有力支持。

此外，随着电动汽车的普及，其智能充电也成为需求侧响应的关键一环。通过充电桩与云端平台的数据交互，系统能够在综合考虑电网负荷状况、实时电价信息以及车辆

电池状态的基础上，制定出最优化的充电策略。这样不仅可以避免大量电动汽车同时充电导致的电网压力骤增，还能通过有序充电和反向馈电功能，使得电动汽车成为电网灵活性资源的一部分。

再者，分布式储能系统的数智化管理也是提升需求侧响应能力的有效手段。通过集成储能设施与智能化平台，可以实时监测储能设备的状态，精准控制其充放电行为，以便在电网需要时快速响应，减轻电网峰谷差带来的压力，提高电力系统的整体运行效率。

5.2 面临的挑战

然而，在具体实践过程中，数智化的发展在经济方面、社会方面、技术方面都面临着现实挑战。

一、经济方面。需求侧数智化改造的技术经济性仍面临多重困难，具体表现为：

（1）投资成本较高

终端负荷、分布式电源与储能等基础设施的规模化建设和数智化改造，投资金额庞大，尤其是对于例如宁夏等送端电网这类高载能负荷地区的数智化升级，所需的成本将会进一步增加。

（2）收益回收前景不明晰

市场机制的不完善，带来成本回收渠道匮乏，商业盈利模式不明晰，进一步导致数智化改造的相关投资回报期较长，投资收益压力将有可能持续存在。

（3）价格激励机制尚不完善

当前的电价政策不足以激励用户参与响应，并且峰谷电价差距不足以反映供需紧张情况。虽然部分省份率先出台了分时电价、需求响应补贴等政策，但在实际操作中如何确保

这些激励措施公平公正且能有效调动各方积极性，仍需探索和完善。尤其针对分布式电源与储能系统，其收益模式和价值体现方式仍有待清晰。

二、社会方面。缺乏广泛社会认知，公众对需求侧资源互动概念理解有待普及，具体表现为：

（1）用户接受度和认知度不足

公众对需求侧资源灵活性、数智化技术等概念理解与认识有限，导致其参与度不高，将会影响应用规模与实际应用效果。

（2）各方主体协调困难

涉及主体众多，如政府、电力公司、电力用户、负荷聚合商、售电公司能源服务公司等，如何有效协调各方达成共识、并充分考虑不同主体诉求，都增加了实践难度。

（3）数据隐私和信息安全隐患

数智化改造涉及大量的电力用户用电数据、行为数据的采集和分析，对于多维度大数据分析挖掘的依赖，有可能导致数据安全、用户隐私泄露的安全隐患。

三、技术方面。数智化技术更新迭代快，选型应用存在一定技术门槛，具体表现为：

（1）数智化技术精准适配性还需要进一步提升

需求侧资源的运行状态和用电数据实时变化，同时海量用户用电相关数据需要高效地存储、清洗、分析和挖掘，不同类型的资源设备调节控制策略需要结合生产特性、用户行为分析等进行学习生成，亟需全面提升数据采集、分析计算、协调优化控制以及对 AI 分析结果的解释的准确性。

（2）缺乏统一的技术标准与规范

各类需求侧资源系统 / 设备的全面互联交互是数智化技术发挥作用的重要基础，但不同厂商设备之间的通信协议、标准不统一，导致互联互通水平差，制约数智化改造效果。

5.3 发展建议

随着海量异构需求侧灵活资源的接入，数智化是目标也是手段，涉及的主体包含电网、负荷聚合商、综合能源服务商、用户等多主体，亟需政府部门统筹从各方面给予支持。

顶层设计方面，明确需求侧灵活性资源发展定位，加强规划统筹衔接，源、网、荷、储多维度协同提升新型电力系统灵活调节能力。加快数字化、智能化技术助力源、网、荷、储智慧融合发展，推动传统电力配置方式由部分感知、单向控制、计划为主向高度感知、双向互动、智能高效转变。推动需求侧资源分层分级分类聚合及协同优化管理，以数字化智能化支撑新型电力系统用户侧建设为手段，加快推动需求侧资源参与系统调节。

在技术发展层面，持续探索 ICT（Information and Communications Technology）前沿技术与需求侧资源互动各环节的融合应用。需求侧资源参与电网互动的未来技术发展趋势表现为自动化、数字化、智能化，技术研发范式上表现为“大数据+”、“AI for Science”、“Decision Intelligence”等全新形态，基于用户侧海量多主体的组织特性和强数据驱动的特征，未来多主体博弈、强化学习、大模型等 ICT 技术将有更大的赋能空间，能充分提升互动策略生成、竞价博弈、利益分配等子任务领域求解的智能化、精细化和科学性。技术方面可大胆创新学科交叉范式，突破传统技术研发模式、知识体系的局限性，采用大交叉、大融合的方式破解重大问题。通过多技术领域赋能或融合应用的形式来对新型电力系统需求侧的各类技术问题进行突破，支撑新型电力系统建设。

系统有效性方面，持续加强软硬件系统的支撑能力，以实现需求侧资源参与电网互动的规模化、常态化。一是针对需求侧资源专用的信息采集、传输及应用中的关键需求开展研发及应用，具体包括：基于自主化芯片打造集成“监测-保护-控制”三大类业务的边缘“感-控”装置、融合 5G 的智能电网控制类业务安全可信接入与可靠保障技术、基于数字孪生的海量多源异构数据中台建模与融合应用，实现分布式用户资源多模态用能信息超融合感知。二是在平台层支撑需求侧灵活资源数字化应用的快速构建与“站-线-变-户”一张图的链接，提供统一、标准的数据与组件化的服务，以智能电网接口为桥梁，实现互动场景资源和数据的对齐。三是在安全层面全面提升用户信息物理社会网络系统软硬件内生安全与防御能力，以应对海量用户接入的信息安全和隐私保护需求。

参考文献

- [1] 陈启鑫, 吕睿可, 郭鸿业, 贾宏杰, 丁一, 王毅, 康重庆. 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
- [2] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2~14
- [3] 顾雄, 邱望标. 电动汽车与电网互动策略研究 [J]. 电子世界, 2017, 22: 44~45
- [4] 李恒强, 徐石明, 陈璐, 杨永标, 杨斌. 楼宇中央空调柔性调控参与电网调峰实证研究 [J]. 南方电网技术, 2016, 10: 51~58
- [5] 康重庆, 陈启鑫, 苏剑, 艾芊, 季宇, 潘巍巍, 高洪超, 吴鸣. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2022, 18: 3~14
- [6] 李彬, 李德智, 杨斌, 石坤, 祁兵, 翟天一. 基于工业互联网云平台的智能用电互动模式研究 [J]. 电测与仪表, 2019, 19: 46~52
- [7] 杨屹洲. 基于数据挖掘的商业电力负荷预测及用电优化算法研究 [D]. 广州: 华侨大学信息工程与科学学院, 2015
- [8] 刘海波, 张华栋, 李建祥, 袁弘, 高玉明. 区域电网充换电站协调控制系统的设计与实现 [J]. 制造业自动化, 2015, 3: 17~20
- [9] 宋毅, 宿洪智, 张培深, 李鹏, 王成山, 赵金利. 基于智能软开关与市场机制的有源配电网阻塞管理方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 20: 9~16
- [10] 曹雨洁, 丁肇豪, 王鹏, 张素芳, 刘吉臻, 刘文娟, 程明. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二): 机遇与挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 10: 3512~3526
- [11] 雍培, 张宁, 慈松, 康重庆. 5G 通信基站参与需求响应: 关键技术与前景展望 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 16: 5540~5551
- [12] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 2: 486

- [13] 李国庆, 闫克非, 范高锋, 边竞, 于国康, 余中平. 储能参与现货电能量 - 调频辅助服务市场的交易决策研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 17
- [14] 冯丽, 李俊, 刘波. 清洁能源消纳背景下的重庆电网需求响应实践 [J]. 华电技术, 2021, 43(1): 71~75
- [15] 张健建, 袁家海. 从供需两端深挖电力系统灵活性资源 [J]. 能源评论, 2022, 9: 50~53
- [16] 16 借势双碳东风: 干“实事”的“虚拟”电厂. 2022. <https://www.tmtpost.com/6128068.html>
- [17] 澎湃网 (2022). 试点推进全省工业企业新型智慧负荷管理示范应用. https://m.thepaper.cn/baijiahao_19330032
- [18] 东南网 (2024). 国网福州供电公司: 数字赋能柔性调节 让空调负荷“活”起来. <https://new.qq.com/rain/a/20240524A02YFY00>
- [19] 国家电网报 (2022). 国网上海电力应用新型电力负荷管理系统. <https://news.bjx.com.cn/html/20220712/1240411.shtml>

作者与鸣谢

作者

中国电力科学研究院有限公司：宫飞翔，陈宋宋，付媛媛，孔祥宇

其他作者

中国电力科学研究院有限公司：陈珂，简子文，王隗东，王舒杨、张梓乾

联系方式

付媛媛，lindafyy@163.com

鸣谢

本报告作者特别感谢以下来自企业和研究机构的专家对报告撰写提供的洞见与建议。

国网宁夏电力有限公司：路洁，金旭荣，王国彬

国网重庆市电力公司：徐威，叶芳菲

国网山东省电力公司营销服务中心：张海静，王所钺

自然资源保护协会：刘明明，陈艺昕，王万兴

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构，以及项目支持方的观点。

