

# 数字电网先进控制技术综述与展望

徐全<sup>1</sup>, 马溪原<sup>1</sup>, 张子昊<sup>1</sup>, 杨铎炯<sup>1</sup>, 李士杰<sup>2</sup>

(1. 广东省数字电网技术企业重点实验室(南方电网数字电网研究院), 广东省 广州市 510663;

2. 中国南方电网有限责任公司, 广东省 广州市 510663)

## Review and Prospect of Advanced Control Technologies for Digital Power Grid

XU Quan<sup>1</sup>, MA Xiyuan<sup>1</sup>, ZHANG Zihao<sup>1</sup>, YANG Duotong<sup>1</sup>, LI Shijie<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Digital Grid Technology (Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, Guangdong Province, China;

2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** With the in-depth advancement of the "dual carbon" strategy, the high proportion of new energy integration into the power grid has brought about systemic challenges such as weakened inertia support, complex dynamic characteristics, and strong randomness on both the supply and demand sides. Traditional control methods have fundamental limitations in response speed, adaptability, and coordination. As the core support of the new power system, the digital power grid's multi-level coordinated control architecture provides a key path to address these challenges. Advanced control technology, as the core hub, has become a fundamental requirement for ensuring the safe and stable operation of the new power system. This paper focuses on two core challenges in the digital power grid: the full integration of new energy and the maintenance of power grid security and stability. It systematically reviews the research progress and applications of advanced control technology. In response to the strong nonlinear dynamic characteristics and coordination difficulties of massive heterogeneous devices in the new power system, advanced control technology has demonstrated significant value in overcoming the response lag and adaptability bottlenecks of traditional control. Using model- or data-driven paradigms can effectively improve system control accuracy, but it still faces common problems, such as insufficient generalization in complex scenarios and conflicts in multi-objective optimization. To meet the requirements of global resource collaborative response and millisecond-level decision-making, a "cloud-edge-device-chip" hierarchical control architecture has been proposed. The cloud-side stability control achieves millisecond-level safety boundary decision-making based on global situation awareness; the edge-side group control significantly improves response efficiency through dynamic

aggregation of distributed resources; the device-side numerical control ensures precise voltage and frequency support for distributed energy; and the chip-side intelligent control breaks through the computing power bottleneck of embedded devices with miniaturized AI chips. Finally, based on technical bottlenecks and development trends, a future development path for hierarchical coordinated control is proposed, focusing on building a four-level closed-loop control system of "cloud-edge-device-chip" in the digital power grid and establishing a hierarchical optimization system to support a high-resilience, low-carbon digital power grid.

**KEY WORDS:** control method; digital grid; advanced control technology; cloud-edge-end-core; hierarchical optimization

**摘要:** 随着“双碳”战略深入推进, 新能源高比例接入引发电网惯量支撑弱化、动态特性复杂化、源荷双侧强随机性等系统性挑战, 传统控制方法在应对这些新挑战时, 逐渐显现出响应速度、适应性与协同能力等方面的不足。数字电网作为新型电力系统的核心支撑, 其多层级协同控制架构为破解上述难题提供了关键路径, 而先进控制技术作为其核心中枢, 其理论创新已成为保障新型电力系统安全稳定运行的刚性需求。聚焦数字电网中新能源充分消纳和电网安全稳定运行两大核心挑战, 系统综述先进控制技术研究进展与应用: 针对新型电力系统强非线性动态特性与海量异构设备协同难题, 先进控制在突破传统控制响应迟滞与适应性瓶颈方面展现出核心价值, 其通过模型驱动或数据驱动范式, 可有效提升系统控制精度, 但仍面临复杂场景泛化性不足、多目标优化冲突等共性问题。为满足全域资源协同响应与毫秒级决策需求, 研究提出了“云-边-端-芯”分层控制架构, 云侧稳控依托全局态势感知实现毫秒级安全边界决策; 边侧群控通过分布式资源动态聚合显著提升响应效率; 端侧数控保障分布式能源的精准电压频率支撑; 芯侧智控则以微型化 AI 芯片突破嵌入式设备的算力瓶颈。最后结合技术瓶颈与发展趋势, 提出分级协同控制的未来发展路径, 着力构建数字电网“云-边-端-芯”四层级闭环控制, 构建支撑高韧性、低碳

基金项目: 中国南方电网公司科技项目(ZBKJXM20232471)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (ZBKJXM20232471).

化数字电网的分层优化体系。

**关键词：**控制方法；数字电网；先进控制技术；云边端芯；分层优化

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.1416

## 0 引言

“双碳”战略目标的持续推进，催生新能源装机容量爆发式增长，加速以“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”为特征的新型电力系统构建。据国家能源局统计，2024 年，全国可再生能源发电新增装机 3.73 亿 kW，同比增长 23%，占电力新增装机的 86%<sup>[1]</sup>；2025 年全年，新增新能源发电装机预计超过 2 亿 kW<sup>[2]</sup>。然而，风光资源的强间歇性与波动性，使得系统运行的不确定性急剧增强，且随着高比例可再生能源接入、大规模电力电子设备并网以及多元负荷的爆发式增长，共同导致系统惯性显著下降、动态特性日趋复杂化等问题<sup>[3]</sup>。百万量级数量的分布式资源接入以及以新能源为主体的新型电力系统面临新的控制问题和挑战，如何“稳准快”（稳定、准确、快速）地控制电力系统百万量级数量的节点，迫切需要先进控制技术。

上述问题对传统电网控制方法构成严峻挑战：一方面，依赖稳态模型、分钟级响应的监控与数据采集系统难以有效跟踪新能源毫秒至秒级的快速波动<sup>[4]</sup>；另一方面，传统依赖人工经验的调度模式在应对“源-网-荷-储”多维变量协同优化<sup>[5]</sup>时力不从心。同时，传统基于精确物理模型的动态规划方法，在面对如此高维、强不确定性的系统时，也深陷“维度灾难”与计算复杂性的困境<sup>[6]</sup>。因此，传统控制体系难以适应新型电力系统的动态特性，亟需发展与其动态特性相适应的先进控制理论、方法与技术体系，以实现系统清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同及灵活智能。

在此背景下，一方面，随着新型电力系统主网“四可”<sup>[7-8]</sup>（可测、可观、可控、可调）、配网“四可”<sup>[9-11]</sup>、分布式资源“四可”<sup>[12]</sup>等核心关键技术的解决，以及工程建设的推进，为先进控制技术奠定了技术基础。另一方面，卢强院士于 2000 年首次提出数字电力系统概念<sup>[13]</sup>，随着人工智能、云计算、边缘计算、芯片等新一代数字技术飞速发展，数字电网<sup>[14-16]</sup>作为支撑新型电力系统构建与运行的核心数字化平台，提供了突破上述困境的关键路径，它通过融合数字孪生技术、人工智能驱动的数据处理算法与物联网通信架构，构建了物理电网与

信息系统的深度耦合智能体<sup>[17-18]</sup>。数字电网核心目标与本质是通过数字化感知<sup>[19]</sup>、智能化决策<sup>[20]</sup>、系统协同化控制<sup>[21]</sup>等数字化技术手段，解决能源转型中的安全、效率和韧性等难题<sup>[22]</sup>。

基于数字电网构建的海量实时数据流、强大边缘/云端计算能力及信息物理深度融合的闭环框架，一系列基于人工智能、大数据、云计算、边缘计算<sup>[23]</sup>等数字技术的先进控制方法展现出巨大潜力，为突破依赖稳态模型、响应迟缓的传统监控调度模式及深陷“维度灾难”的精确模型优化困境提供了可能。这些先进控制技术的创新与应用，已成为保障系统安全、稳定、高效运行的关键突破口。

本文旨在系统性综述与展望面向数字电网的先进控制技术，围绕新型电力系统面临的新能源充分消纳和电网安全稳定运行两大核心挑战展开深入研究，具体体现在系统惯性补偿、不确定性抑制、“源-网-荷-储”协同优化等方面。1) 可再生能源大规模接入导致系统惯性下降，电网应对功率扰动的能力削弱，频率与电压失稳，严重威胁暂态稳定<sup>[24]</sup>。数字电网需实时感知系统状态，通过旋转备用、一次调频等功率调节技术，为系统提供及时的功率平衡与频率支撑，以筑牢电网暂态稳定的基础。2) 风光出力的强波动性与负荷随机性相互叠加，使电力系统运行调度的不确定性增强<sup>[25]</sup>。对此，数字电网需依托高频数据采集与人工智能预测算法，有效平抑波动，维持实时功率平衡，保障系统持续可靠运行。3) 在单一环节调控已无法统筹安全、经济与低碳目标的情况下，数字电网可通过“源-网-荷-储”协同优化打破多环节数据壁垒，实现源侧预测优化、网侧潮流调节、荷侧需求响应与储侧多功能协同，从而全面提升可再生能源消纳能力与系统的综合运行效率。

本文系统梳理了先进控制理论的研究进展，剖析了有模型控制与无模型控制的原理、应用优势及工程瓶颈；在此基础上，结合“云-边-端-芯”协同架构，分层阐述了数字电网先进控制的关键技术。最后，针对技术落地瓶颈与新型电力系统发展需求，提出“1+4+N”分级协同控制的发展路径，以期构建新型电力系统提供理论支撑与工程参考。

## 1 先进控制理论

控制科学经过经典控制、现代控制、智能控制等阶段，内涵不断丰富和发展。依据控制方法对数学建模与先验知识的依赖特征，可将控制技术分为 2 类，即有模型控制与无模型控制<sup>[26]</sup>，如图 1 所示。

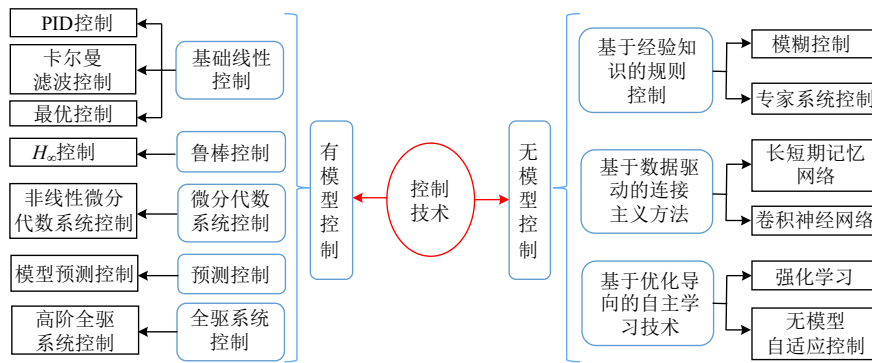


图1 基于模型依赖性的控制技术分类

Fig. 1 Classification diagram of control technologies based on model dependence

其中，有模型控制技术基于传递函数、状态方程等数学表征，涵盖改进PID控制、卡尔曼滤波控制、最优控制、鲁棒控制、微分代数系统控制、模型预测控制、高阶全驱系统控制等方法。这类控制技术的典型特征均以数学模型为分析和设计的基础，通过信号测量和反馈，解决被控对象的系统分析、控制和优化问题，但是在遇到模型复杂难以精确建立的时候，尤其是非线性、时变系统时，难以实现稳定的精准快速控制<sup>[27]</sup>。无模型控制技术则主要是基于数据驱动、人工智能的方法，包括模糊控制、专家系统控制、神经网络控制、强化学习控制、无模型自适应控制等技术。以下将从有/无模型控制2个角度，针对先进控制技术在新型电力系统中的应用开展研究综述。

### 1.1 有模型控制

有模型控制技术以数学机理为核心，通过构建被控对象的精确动态方程实现系统优化。PID控制等传统控制方法因其结构简单、稳定性好、工程经验丰富，至今仍是工业控制的主流选择。然而，在新型电力系统中，高比例可再生能源并网引发的强非线性、多时间尺度振荡、惯量缺失等问题，迫切需要控制技术不断迭代改进，以适应智能电网的发展。诸多有模型控制技术可大致划分为以下几类：1) 基础线性控制，诸如改进PID、卡尔曼滤波、最优控制等，其基本思路是，首先建立系统的线性模型，然后通过状态反馈等方式来设计控制器，最终达到提升系统某项或多项性能的目的。然而在新型电力系统背景下，风光功率随机波动会导致系统参数呈现时变和非线性的特征，使得模型失配进而致使性能退化。2) 鲁棒控制则以保守性换取稳定性，其特征在于通过放宽模型匹配要求，进而提升容忍参数波动与外部干扰的能力，但这种提升是以牺牲动态性能与经济性为代价的，在需要快速响应的场景中适用性受限。3) 微分代数系统控制的核心在

于严格处理同时包含动态方程(微分方程)和静态约束(代数方程)的复杂系统模型，其优势在于能在统一框架下刻画系统多时间尺度动态并严格保证约束满足性，但其代价是模型高复杂性易引发数值求解困难与实时性挑战，且理论分析工具相对受限。

4) 预测控制，其通过在每个控制周期内预测系统的未来行为，并优化未来的控制动作，来达到控制目标，适用于多输入多输出、带有时滞和各类约束的复杂系统，能够在线优化并处理各种约束，但该方法存在模型复杂性高、对模型不确定性敏感等问题，且计算量大。5) 全驱系统理论由段广仁院士提出，为电力系统非线性或线性控制提供了一种新的视角，其核心在于能够通过精确的控制设计，确保系统每个自由度都能够被单独控制，以控制变量为主角，以状态变量为配角，在可行集上解析地求解出其控制变量，这种特性为设计高性能控制器提供了更大的可能性，极大地简化了控制策略的设计过程，并提高了设计的效率，且该方法已被证明在多个领域具有显著的优势。有模型控制技术的进步不仅反映了理论方法内在的发展逻辑，而且一定程度上满足电力系统“双高”特性下安全稳定控制的迫切需求。

#### 1) 基础线性控制。

基础线性控制技术作为工业控制的基石，其核心在于构建精确的线性时不变模型实现系统优化。改进PID通过参数自整定提升鲁棒性，卡尔曼滤波融合噪声统计特性实现最优状态估计，最优控制则基于目标函数加权最小化实现动态优化。文献[28]通过改进海洋捕食者算法，优化了自动电压调节系统的分数阶PID控制器参数，该方法不仅提升了系统的动态响应速度，还显著改善了系统的控制精度与稳定性。文献[29]基于奇异值分解与自适应滤波的改进容积卡尔曼滤波方法，通过实时修正过程噪声参数并解决协方差矩阵非正定问题，显著提升了

含分布式光伏配电网的动态状态估计精度,尤其在光伏出力波动时具有突出优势。文献[30]研究了双馈风电机组的一次调频策略,其采用的自适应线性二次高斯最优控制方法能通过实时求解 Riccati 方程动态优化调频功率,在精准跟踪系统调频需求的同时显著降低机组疲劳载荷。虽然此类技术在新型电力系统中广泛应用于同步发电机励磁控制、电网状态估计等场景,但随着新能源渗透率不断提高,而新能源天然具有随机性、波动性和间歇性,导致线性理想化模型与非线性现实工况之间的矛盾愈发凸显。

#### 2) 鲁棒控制。

鲁棒控制方法是针对系统不确定性和扰动设计的控制策略,其通过主动放宽模型匹配要求来抵御不确定性,进而保障系统的整体性能。文献[31]提出了一种融合  $\mu$  综合与遗传算法的最优鲁棒控制策略,该方法以最小化系统的结构化奇异值  $\mu$  为目标,以优化固定结构控制器的参数,有效提升并网逆变器在电网阻抗和时延不确定性下的适应能力。文献[32]提出了一种事件触发自适应动态规划算法,通过将外部扰动转化为零和博弈输入并设计单评价网络结构,实现带输入约束的非线性多智能体系统  $H_\infty$  一致性控制,确保局部一致性误差和评价网络权重误差均具有一致最终有界性。然而,其防御性设计亦会造成系统其他性能的衰减,类似于以鲁棒性换取经济性的代价在频繁调频场景中表现得尤为显著。

#### 3) 微分代数系统控制。

微分代数系统作为一种重要的建模与分析工具,已在科学和工程技术领域中得到了广泛应用。微分代数系统控制能够通过精确解析微分-代数耦合结构突破传统建模局限,在电力系统领域中,文献[33]基于微分代数系统的李雅普诺夫稳定性分析框架,通过常微分方程嵌入法与约束流形上的能量函数构造,突破传统电力系统稳定性分析对精确数学模型和局部线性化的依赖,为含非线性负荷的电网提供全局稳定性判据与吸引域估计方法。文献[34]提出了一种微分代数非线性系统的多目标反馈控制设计框架,利用线性空间映射理论,实现了对多种关键设备动态状态和目标量的协同控制,解决了传统方法在综合性能和动静态协调性方面的难题。文献[35]提出一种基于李雅普诺夫理论的非线性微分代数系统联合状态估计框架,实现了发电机动态状态(转子角/频率)与电网代数变量(电压/相角)的实时耦合估计,突破传统解耦方法的理论局限

与计算瓶颈。然而,微分代数系统控制的实际应用仍面临三大挑战:其一,高微分指数易导致数值求解的病态性问题;其二,在复杂非线性约束下普遍存在解析解匮乏的困境;其三,多时空尺度紧密耦合,引发了严峻的实时计算瓶颈。

#### 4) 预测控制。

模型预测控制基于滚动时域优化策略,通过反复求解有限时域内的最优控制问题,动态调整控制指令,突破传统控制方法的性能限制,实现系统控制精度与稳定性的提升,在电力电子设备控制中展现出显著优势。文献[36]提出了一种基于非线性电感与无差拍原理的改进模型预测控制策略,通过简化预测计算过程并设计双观测器克服参数波动,实现直流微电网中恒功率负载的阻抗稳定匹配,显著提升系统瞬态响应能力及固定开关频率下的鲁棒性。文献[37]提出了双滑模控制与模型预测控制协同的开关磁阻电机调速策略,通过扰动观测器进行前馈补偿,并利用全局积分滑模控制来提升响应速度,结合模型预测控制内环抑制转矩脉动,显著增强系统抗干扰能力。然而,预测控制仍面临着实时计算负担过重、系统参数敏感性高以及复杂约束条件下的优化求解困难等问题。

#### 5) 全驱系统控制。

全驱系统理论由段广仁院士团队于2020年提出<sup>[38-40]</sup>,其颠覆了传统状态空间模型框架,通过将物理系统转化为可显式求解控制向量的数学全驱模型,实现了复杂系统的直接解析控制<sup>[41]</sup>。其核心突破在于证明了欠驱动系统可等价转化为全驱系统,支持闭环极点任意配置和线性化设计,并建立了覆盖连续/离散、时滞及脉冲系统的统一框架。针对恒功率负载引发上游 Buck 变换器不稳定性的难题,文献[42]基于高阶全驱系统(high-order fully actuated systems, HOFA)方法构建了鲁棒控制策略,所提出的控制器不仅确保了系统的信号稳定性,还能在宽工作范围内实现精准跟踪和快速动态响应。文献[43]研究基于变换器的串联多母线直流微电网,针对电压恢复与电流均衡的权衡问题,提出基于分布式学习的高阶全驱二次控制器,该控制结构简单、适配微电网底层物理特性,依托高阶全驱模型实现快速的电压动态响应与精确的电流分配性能。文献[44]在微电网模型中增加分布式资源之间联络线阻抗,使模型更精确,并增加微电网状态预测技术,提出了分布式最优全驱系统预测控制策略,显著提升了控制器的动态与静态性能,但未考虑控制过程延时的影响。

在上述应用中,全驱系统理论虽然降低了对标准状态空间模型的依赖,但依然需要构建系统的全驱模型。因此,对于结构复杂、参数时变的实际电力电子设备,精确获取其全驱模型并非易事,而模型准确性又会直接影响控制性能的发挥。此外,虽然理论解析表达式相对简洁,但对于高阶系统,尤其是涉及实时参数更新时,对于处理器的计算能力会有较高要求,在考虑低成本、大规模部署时仍面临算力受限的问题。在工程实践上,目前全驱系统在电力领域的应用多集中于学术仿真和实验室小功率平台,缺乏在大型复杂现场的长周期、大规模实证研究,其可靠性、鲁棒性和维护便利性有待进一步验证。

尽管全驱系统控制在电力系统应用中仍面临复杂工况下难以精确建模与实时计算负担大的问题,但未来前景显著,尤其在分布式新能源控制、多智能体协同调控等场景具有革新潜力。若能结合数据驱动、可信人工智能技术,全驱系统有望充分发挥其解析控制的优势,从根本上提升系统控制的精确性与协调性。

有模型控制子类技术的性能对比如表 1 所示。

方法类型	响应速度	计算复杂度	鲁棒性	典型瓶颈	文献
基础线性控制	中高	低	低	参数时变导致失配	[28-30]
鲁棒控制	中	中	高	牺牲动态性能和经济性	[31-32]
微分代数系统控制	中低	高	中高	高微分指数导致数值病态	[33-35]
预测控制	高	高	中	实时计算负担重	[36-37]
全驱系统控制	高	中高	高	复杂工况建模困难	[42-44]

## 1.2 无模型控制

无模型控制技术不依赖被控对象的精确数学模型,而是通过数据驱动或智能算法实现系统优化,在应对高比例可再生能源带来的强非线性、多时间尺度耦合等挑战中展现出独特价值<sup>[45]</sup>。本小节将系统综述模糊控制、神经网络、强化学习等典型无模型方法在新型电力系统中的研究现状,并分析其应用优势与工程瓶颈。首先,基于经验知识的规则控制技术,包括模糊控制与专家系统控制,为构成早期无模型技术的代表。在电力系统应用当中,模糊控制能够通过隶属度函数处理非精确信息,专家系统控制则可以利用预置规则库实现故障诊断,然而,其性能高度依赖人工经验,导致难以适应源荷双侧的随机扰动。基于数据驱动的连接主义方

法,包括神经网络/深度学习,其通过端到端学习实现输入与输出之间的复杂映射,在电力系统中常见的应用有:基于长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)模型的短期负荷预测、基于卷积神经网络的异常识别等,虽然能够有效处理复杂的非线性问题并保持较高的鲁棒性,但其黑箱特性仍严重制约工程可信度。基于优化导向的自主学习技术则主要包括强化学习与无模型自适应控制技术,其中,强化学习(reinforcement learning, RL)能够通过智能体与环境的持续交互学习最优控制策略,其核心是构建状态-动作-奖励的映射关系,以累积奖励最大化为目标动态优化决策<sup>[46]</sup>。在新型电力系统中,其已应用于储能经济调度、电压稳定控制等场景,但其也面临样本效率与安全性的双重挑战:一是需要大量训练数据且训练过程不稳定,二是缺乏物理约束机制可能导致动作越限风险<sup>[47]</sup>。无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)仅依赖系统输入输出数据动态整定控制器参数,无需对象数学模型<sup>[48]</sup>,其通过紧格式动态线性化构建伪梯度矩阵,能够实现快速响应。在 MFAC 的实现过程中,尽管其不依赖精确模型,但对模型误差和噪声仍较为敏感,此外,控制参数的调整也需要考虑系统动态特性,可能会对其速度和准确度产生影响。

### 1) 基于经验知识的规则控制。

模糊控制利用隶属度函数量化语言变量,在微电网电压调节中表现出对非精确信息的适应性,专家系统则基于逻辑推理规则实现故障诊断功能。文献[49]提出了一种基于非洲秃鹫算法优化的模糊逻辑控制策略,将生物启发算法与模糊控制深度融合,显著提升分布式微电网在功率动态平衡场景的鲁棒性,与传统比例积分控制器相比,该策略能够在多源强耦合工况下实现更精准的源荷协同调控,有效保障复杂负荷供电可靠性。文献[50]提出了一种专家知识深度嵌入的强化学习决策框架,通过专家示范预训练、多重优先经验回放及无效动作屏蔽三重机制,实现配电网灾后恢复的快速安全决策。然而,其核心瓶颈在于规则库的静态特性与动态环境的矛盾,即当源荷双侧随机扰动加剧时,规则匹配失效率显著上升,人工经验难以实时更新复杂规则体系。

### 2) 基于数据驱动的连接主义方法。

在新型电力系统中, LSTM 被广泛用于高精度负荷预测,文献[51]提出了一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)与双向 LSTM 的融合预测框架,通过 EMD 将非平稳电力负荷序列分解为多尺度稳态分量,并利用双向 LSTM 充分

学习其时序特征，精准捕捉负荷变化的长期规律与短期波动，实现 24h 超高分辨率负荷预测，在预测精度与模型拟合度上显著优于传统模型。文献[52]提出了一种端到端的 CNN-Transformer 混合架构，通过一维深度 CNN 精准提取故障电流时空特征，并创新引入 Transformer 编码器的注意力机制，能够对其时空特性进行精准建模，实现对配电网对称/非对称故障及高阻抗故障的全息检测与定位。然而，这类方法的工程化面临两大瓶颈：1) 复杂模型往往被视为“黑箱”，其内部决策过程缺乏可解释性，使得系统在发生异常后，难以定位问题根源并彻底解决；2) 强数据依赖性导致模型泛化能力不足，当训练数据与真实场景数据存在分布差异时，其性能会显著下降。

3) 基于优化导向的自主学习技术。

强化学习方法目前已应用于电力系统的多个领域，其采用交互式学习优化长期收益，在微电网运行与能量管理方面已展现出良好效果，文献[53]提出了一种基于在线强化学习的微电网能量管理优化框架，通过状态-动作-奖励动态建模与实时环境交互机制，突破风光储系统间歇性与不确定性约束，实现储能运行成本最小化与计划跟踪精准协同，在电动汽车充电负荷场景中验证其较模型预测控制与深度 Q 网络(deep Q-network, DQN)的显著性能优势。但该方法也存在训练过程需大量交互样本以及策略缺乏物理约束机制等固有缺陷。文献[48]提出了一种基于无模型自适应控制与径向基神经网络观测器的船舶微电网二次调频策略，通过紧格式动态线性化技术将负载扰动融合为非线性项，结合数据驱动机制实现频率偏移的自适应抑制，突破传统虚拟同步发电机控制器对精确模型的依赖。虽然该方法不依赖于精确的模型，但在新型电力系统中仍面临动态耦合适应性差、噪声敏感性强、参数整定依赖经验、暂态收敛性不足等问题。

无模型控制子类技术的性能对比如表 2 所示。

综上所述，有模型与无模型控制技术在新型电

力系统安全稳定运行中各有侧重，两类控制技术的特性对比如表 3 所示。其中，有模型控制以数学机理为核心，从基础线性控制、鲁棒控制、微分代数系统控制到预测控制，再到全驱系统控制，其应对强非线性等挑战的能力不断增强，但仍受限于精确建模困难、计算负担大等问题。无模型控制不依赖精确模型，从基于经验的模糊与专家系统控制，到数据驱动的神经网络方法，再到优化导向的强化学习与无模型自适应控制，在处理复杂非线性问题上优势显著，却面临经验依赖、黑箱特性、样本效率等瓶颈。两类技术均针对系统“双高特性”持续优化，未来需结合各自优势突破瓶颈，为新型电力系统稳定控制提供更优方案<sup>[54]</sup>。

**表 3 有无模型控制技术的特性对比**

**Table 3 Characteristic comparison of model-free control technologies**

项目	有模型控制	无模型控制
核心原理	依赖精确数学建模 (传递函数/状态方程)	数据驱动或规则驱动，无需精确模型
典型方法	线性控制、鲁棒控制、预测控制、全驱系统	模糊控制、神经网络、无模型自适应控制
优势	机理明确，参数物理意义清晰	适应强非线性系统，自主学习优化能力
局限性	高维系统面临“维度灾难”，新能源场景模型失配	黑箱特性降低工程可信度，依赖大量训练数据
适用场景	参数可测、动态可建模系统	强非线性/高不确定性场景

## 2 云侧稳控技术

云侧稳控技术作为数字电网先进控制架构的核心决策层，支撑数字电网全域安全稳定与资源优化<sup>[55]</sup>，定位于大电网的安全稳定分析与全局优化决策<sup>[56]</sup>。该技术体系在继承与发展传统第二道防线<sup>[57]</sup>(通过配置安全稳定控制系统，依据预设策略执行切机、切负荷、直流紧急控制等措施，以应对单一元件三相断开、母线故障、直流双极闭锁等故障，保障系统稳定运行)功能的基础上，其核心使命进一步拓展：依托多源异构数据融合、毫秒级实时计算与全局优化算法，应对高比例新能源接入所带来的强随机性、波动性与复杂性挑战，如低惯量<sup>[58]</sup>、宽频振荡<sup>[59]</sup>、潮流多变<sup>[60]</sup>。

新能源并网引发的宽频振荡、功率突变等动态过程可能在数百毫秒内迅速发展并威胁系统稳定<sup>[61]</sup>，这对控制系统的感知与决策速度提出了更高要求。得益于同步量测技术<sup>[9]</sup>、数据融合技术<sup>[62]</sup>、高效并行计算<sup>[63]</sup>与先进优化算法<sup>[64]</sup>的进步，云侧系统已具备在数十至数百毫秒内完成态势感知、稳定评估与控制策略生成的基础。该技术可推动电网从传统“故障后响应”向“风险前预控”转变，支撑

**表 2 无模型控制子类技术性能对比**

**Table 2 Performance comparison of model-free control subclass technologies**

方法类型	环境适应性	可解释性	数据利用效率	部署成本	文献
基于经验知识的规则控制	低	高	高	低	[49-50]
基于数据驱动的连接主义方法	高	极低	低	高	[51-52]
基于优化导向的自主学习技术	极高	中	中	中	[48,53]

系统实现更高水平的主动安全防御。

然而，传统解析法难以适应高比例可再生能源新型电力系统复杂多变的运行工况；传统机器学习方法则存在应用碎片化、计算复杂及适应性差等固有难题。在新型电力系统复杂多变环境下，难以满

足安全稳定分析与实时决策对精度和速度的迫切需求。因此，发展电力系统态势感知与稳控分析决策技术，成为突破瓶颈的关键。本节将从智能感知、稳定分析与稳定控制等核心环节进行阐述，技术体系架构如图 2 所示。

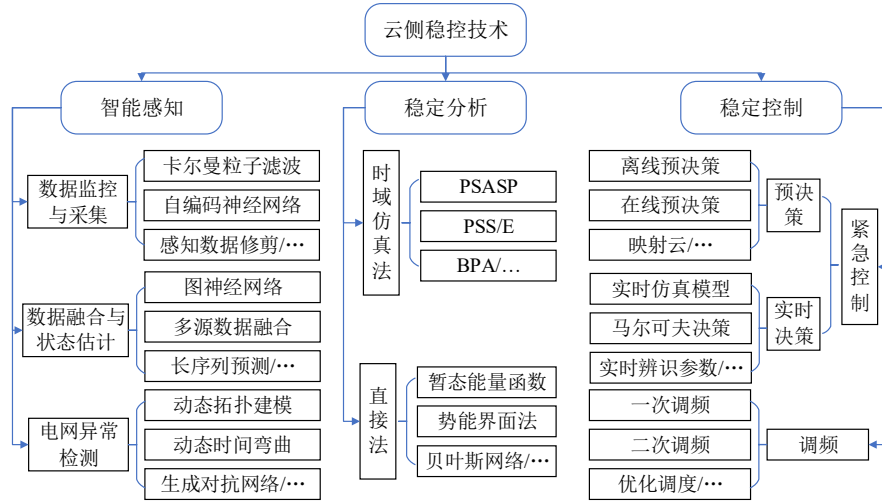


图 2 云侧稳控技术架构

Fig. 2 Cloud-side stability control technology architecture

### 2.1 电力系统运行状态智能感知

随着新型电力系统向高比例可再生能源接入、高比例电力电子装备及多能互补方向转型，其数据呈现高维度、多尺度、强异构特征，推动智能感知技术从单一电气量测向多源异构融合演进。

在数据监控与采集领域，传统监视控制与数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)<sup>[65]</sup>虽能实现全网节点电气量的广覆盖采集，但其量测精度有待进一步提升，催生基于扩展卡尔曼粒子滤波的动态状态估计方法<sup>[66]</sup>、联合优化相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)布置与系统感知数据修剪<sup>[67]</sup>等方法。文献[66]以粒子滤波为框架，利用扩展卡尔曼滤波构建采样密度函数，有效缓解了粒子退化问题并提升了强非线性场景下的估计精度。文献[67]通过系统感知数据修剪，结合系统空间误差传播建模，提出了改进型最优 PMU 部署方案，显著降低了监测成本。

在数据融合与状态估计领域，针对新型配电网状态估计面临的量测缺失、噪声干扰、不良数据及动态特性等挑战，目前开展了广泛研究以寻求有效的解决方案。文献[68]提出了图神经网络与 Informer 融合的配电网状态估计方法，实现了对电网空间拓扑与时间动态特性的有效捕获。文献[69]提出改进自注意力变换器架构的状态估计方法，增强了在量测缺失情况下的状态估计鲁棒性。文献[70]提出基于最大互信息熵准则的自适应多源数据融合框架，

能自动抑制异常值，提升了估计精度与物理一致性。同时，文献[71]在谐波状态估计中整合多源量测实现高分辨率动态区间建模，显著提升了复杂场景下的估计精度。

在电网异常检测领域，早期时域方法受限于单点计算效率，催生多种前沿异常检测方法。文献[72]采用数据驱动方法，依托随机矩阵理论挖掘高维数据统计特性，实现了系统级异常检测，具有较好的全局检测能力。文献[73]提出内嵌物理知识的图神经网络方法，可精准识别多类异常信号并追溯异常原因，物理可解释性强。文献[74]提出改进动态时间弯曲算法与局部离群因子相结合的检测方法，实现了对频率数据的高效分类检测，在频率类异常检测场景中表现出突出的检测效率。文献[75]提出基于动态拓扑建模并聚合历史数据的检测方法，通过动态刻画电网拓扑距离关系、融合历史运行数据强化模型对电网状态的认知，进一步强化了大规模电网异常检测的鲁棒性，提升了复杂电网环境下检测结果的稳定性。

电力系统运行状态智能感知技术正从单一量测向多源异构数据融合深度演进。为应对新型电力系统的高维数据挑战，在数据采集层面，通过优化 PMU 布点与先进估计方法弥补了传统 SCADA 的不足；在状态估计领域，图神经网络、注意力机制等 AI 模型显著提升了估计精度与鲁棒性；在异常检测方面，数据驱动与物理知识结合的方法增强了

检测的准确性与可解释性。然而,该技术仍面临高比例新能源随机性引发的误判风险、混合量测特征综合辨识精度不足以及极端工况下模型适应性较弱等挑战。

## 2.2 电力系统稳定分析技术

电力系统稳定性定义为事故扰动后保持稳定运行的能力<sup>[57,76]</sup>,并根据动态特征、扰动规模和参与元件进行分类。当前主流机理性分析方法包括时域仿真法和直接法。

时域仿真法通过求解微分代数方程组获得变量时域响应(如 PSASP、PSS/E、BPA、PSAT<sup>[77]</sup>等机电暂态软件),从而评估电力系统稳定状态,其优势在于实际系统建模经验成熟、场景还原度高,是工程中最常用的分析手段,但面临新能源接入导致的精确建模困难、大电网计算效率低、缺乏稳定裕度信息三大局限。

直接法是一种基于动态系统稳定域理论的快速稳定评估技术,其核心在于构建系统的稳定域,通过比对故障切除后瞬时状态与稳定域的位置,直接判断系统是否稳定,同时提供定量的稳定裕度。比较典型的方法如暂态能量函数法,其基于李雅普诺夫理论构造能量函数,结合临界能量评估稳定性。文献[78]提出一种基于能量函数法的定量分析方法,通过对风机控制系统合理降阶,构建考虑外环控制与虚拟惯性影响的广义摇摆方程,进而建立暂态能量函数,并利用势能界面法确定系统临界能量,对故障临界切除时间的预测误差仅为 3%。文献[79]提出一种交直流系统风险评估方法,该方法通过将暂态能量函数作为变量融入贝叶斯网络,构建风险评估框架,并利用团树传播算法实现节点后验概率的动态更新,在改进 IEEE-39 节点系统中的测试表明,该方法能够准确识别故障传播路径,计算效率显著提升,风险评估精度优于传统方法。文献[80]提出一种能量函数建模与潮流计算优化方法,通过推导系统近似能量函数建立凸优化模型,该方法在母线电压幅值和功率平衡方面表现出较高计算精度,同时对多种节点类型具备良好适应性。

电力系统稳定性分析技术正从传统时域仿真向快速判别与稳定裕度量化并重的方向深化发展。时域仿真法凭借成熟的建模经验与高还原度,仍是工程实践的核心工具,但其面临新能源接入后建模精度与计算效率的双重挑战。以暂态能量函数法为代表的直接法能通过构建稳定域实现快速稳定性判断与裕度评估,相关研究通过构建更精确的系统动态模型、将稳定性评估与系统风险评估相结合,

利用数学优化方法显著提升了分析的准确性与效率。然而,现有研究方法仍存在一定的局限性,部分模型对设备内部动态的过度简化易引入误差,在参数差异较大的场景下等值精度不足,同时,新能源出力不确定性的刻画尚不完善。

## 2.3 电力系统稳定控制技术

风能和太阳能等间歇性新能源的随机性和波动性使得电力系统的运行状态变得更为复杂和难以预测<sup>[81]</sup>,也对电力系统的稳定控制提出了更大的挑战<sup>[82]</sup>。

电力系统“紧急控制”是应对大扰动、维持稳定运行的关键防线,该技术体系通过自动快速执行切机、切负荷等一系列控制措施,旨在防止稳定被破坏与事故扩大<sup>[57]</sup>,当前紧急控制技术主要分为预决策与实时决策两类。

1) 预决策系统通过预先制定策略表实现快速响应,其中离线预决策系统基于历史数据生成静态策略表,虽实现简单、成本低且可融入人工经验,但存在保守性强、适应性差及预想事故集失配风险;在线预决策系统是指基于电力系统当前运行工况和实时/准实时量测数据,针对预设的预期事故集,在线计算满足系统稳定裕度要求且控制成本最低的控制策略,形成动态更新的策略表。文献[83]基于映射云的在线预决策暂态稳定控制方法,动态刷新策略表实现电网工况跟踪,以最低控制成本快速生成稳定策略,显著提升暂态稳定水平并减少人工计算负担,但受限于策略表更新滞后性,对参数剧变及高比例新能源场景适应性不足。文献[84]提出一种基于多数据源融合的电网准在线调度预决策方法,该方法以河南电网现有调度机制为基础,构建包含数据结构层、样本存储分析层、电网运行态势分析层和应用层的四层架构体系。以未来一周为核心尺度,通过聚类 AI 算法实现电网多状态协同分析。基于该方法,河南电网 220kV 及以上设备风险分析中 50%实现系统级初步规避,40%实现自动分析,危险模式识别达秒级,成功识别 0.23Hz 多节点扰动风险。

2) 实时决策系统<sup>[85]</sup>是指在电网故障发生后动态生成并立即执行控制策略的技术体系,其核心在于通过实时数据分析与快速算法实现“决策-控制”闭环。现有研究已围绕实时决策系统展开多项探索,文献[86]提出一种电压稳定实时评估方法,通过构建实时短路比及临界实时短路比指标,建立涵盖参数估计、指标计算、安全预警的系统架构与算法流程,在 IEEE39 节点系统及实际电网算例中均

验证了指标的准确性，可实现电压支撑强度的就地实时监测，有效支撑高比例新能源并网消纳，且在电压稳定实时评估场景中展现出明显优势，弥补了传统评估方法实时性不足的缺陷。文献[87]提出一种电网调度优化方法，将电网调度问题建模为马尔可夫决策过程，采用双缓冲区生成对抗模仿学习算法，并结合柔性行动器-评判器算法，针对性优化离线训练效率与在线决策性能，该方法收敛速度较传统调度优化算法有明显提升，大幅缩短了模型训练周期，同时为在线调度决策的快速响应奠定了基础。文献[88]提出基于点估计仿射可调鲁棒优化的风电不确定性调度方法，通过“预估-矫正”凸化方法求解混合整数双线性问题，引入凸函数差优化提升求解质量，提高了调度经济性与新能源消纳能力，降低了弃风成本。

在电力系统的紧急控制体系中，维持频率稳定是应对扰动、防止事故扩大的关键环节。然而，随着新能源占比的不断提高，系统呈现出低惯量、低阻尼的新特性，这使得传统的“惯性-一次-二次”三级响应框架面临惯量下降、调节资源不足等挑战<sup>[89]</sup>。当前研究聚焦于指令分配算法从固定比例分配转向智能优化<sup>[90]</sup>，但单目标优化难以协调控制性能与经济性，可通过多区域协调控制，如模糊模型预测控制及强化学习提升跨区域协同能力。文献[91]将模糊控制与模型预测控制结合应用于虚拟同步发电机，模糊控制器动态调整虚拟惯性和阻尼系数，优化额定功率以协同补偿功率波动，减小了频率偏差和频率变化率，提升了微网频率动态响应能力。文献[92]提出 AdapSafe2 方法，通过元学习捕获非平稳系统参数，结合安全评论家网络与控制屏障函数识别安全约束，伪轨迹生成增强策略适应性，实现多区域低惯量系统调频，满足频率偏差和动态约束，提升了安全状态，降低了控制成本，在异常场景和部分观测下仍保持高安全性。文献[93]采用多智能体近端策略优化，平衡调频性能与机械安全，将风电场调频建模为分散决策过程，各风机基于本地观测实时调整惯性和下垂增益，提高频率最低点，减少频率波动。然而，数据壁垒、模型依赖性与算法收敛性仍是实际应用瓶颈。调频辅助服务市场机制虽激励了快速响应资源参与，但异质能源耦合与多主体博弈进一步增加了自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 策略的复杂度。

电力系统紧急控制技术正从传统预决策模式向实时化、智能化方向加速演进。为应对高比例新能源的随机波动，预决策系统正通过在线计算等方

法持续优化，但其在应对极端随机性与新型风险时仍面临策略适应性的挑战。实时决策系统则凭借先进算法架构，展现了故障后快速闭环控制的潜力，但其大规模应用仍受限于算力、通信与算法可靠性。在频率稳定领域，调频控制研究已转向智能优化与多区域协同，有效提升了动态响应能力。然而，数据壁垒、模型依赖性问题仍待解决。

在数字电网的建设进程中，云侧稳控技术作为数字电网的核心决策层，为应对高比例新能源接入带来的挑战提供了多层次技术支撑。智能感知领域通过扩展卡尔曼滤波、PMU 优化布点与图神经网络等创新方法，提升了数据精度与状态估计鲁棒性。稳定分析领域借助暂态能量函数法，实现了快速稳定判别与裕度评估。在稳定控制领域，预决策系统通过动态刷新策略表实现运行工况跟踪，实时决策系统基于强化学习构建快速响应闭环，调频控制则引入模糊预测与元学习等智能方法，有效提升系统频率稳定性与跨区域协调能力。然而，该技术体系仍面临一些挑战。智能感知需应对极端场景误判与数据融合难题，稳定分析存在模型简化引入误差与系统运行调度不确定性刻画不足等局限，稳定控制受算力、通信实时性与算法可靠性制约。未来，云侧稳控技术应在极端工况适应性、算力-精度平衡与跨主体协同等方向持续突破，通过多技术融合与轻量化部署，推动新型电力系统向主动防御与高效弹性方向演进。

为更直观对比不同研究的优势与局限，表 4 从方法类型、核心优势、主要局限 3 方面对云侧稳控关键技术的文献进行归纳。

### 3 边侧群控技术

边侧群控技术依托边缘计算，对区域设备群进行实时质量监控与协同控制，是支撑数字电网运行发展的关键<sup>[94]</sup>，在实现生产异常快速响应、参数动态优化、群体设备联动调节中具有重要意义。随着分布式资源(distributed energy resource, DER)、电动汽车充电设施等新要素广泛接入，配电网侧涌现大量以负荷聚合商、虚拟电厂、微电网为代表的新型聚合体，推动配电系统形态由单向供电向多元协同演进。针对此过程中出现的百万量级分布式资源控制难题，文献[95]提出了“DER+智能电网”的方案策略，通过建立一个高度自动化和广泛分布的能量交换网络，将分布式计算和通信的优势引入电网，达到信息实时交换和设备层次上近乎瞬时的供需平衡，该方案的实施不仅有助于用户获得高可靠

性、高安全性、高质量和价格合理的电力供应，还能提升国家能源安全水平，推动能源可持续发展。同时，多品种交易的电力市场、碳市场并行发展，进一步加剧了系统调控的复杂性与不确定性。多元主体物理-信息协同计算与交互机理刻画困难、多时空尺度灵活资源响应能力评估和配电网高精度态势感知困难、灵活资源自适应动态聚合群控困难、

多元灵活资源有效参与市场交易并实现利益均衡困难等一系列技术瓶颈问题亟待解决。上述难题严重制约了分布式灵活资源的高效利用和配电系统的安全运行，迫切需要开展分布式资源动态聚合群控技术研究，以突破关键技术瓶颈，支撑新型电力系统建设，其技术方面难题与对应控制技术解决方法如图 3 所示。

表 4 云侧稳控技术归纳						
Table 4 Summary of cloud-side stability control technology						
技术领域	子方向	方法/技术	核心优势	主要局限	文献	
数据监控与采集		扩展卡尔曼粒子滤波	缓解粒子退化，提升非线性场景估计精度	极端场景效率稳定性待验证	[66]	
		联合优化 PMU	资源消耗减少	极端电网拓扑剧变时适应性待验证	[67]	
智能感知	数据融合与状态估计	图神经网络+长序列预测	精准捕获空间拓扑与时间动态特性	大规模电网下实时计算效率不足	[68]	
		改进自注意力变换器+鲁棒去噪层	鲁棒性强	适配性待提升	[69]	
电网异常检测		随机矩阵理论+高维数据统计	系统级异常检测，全局性好	引发伪异常误判风险高	[72]	
		内嵌物理知识的图神经网络	异常识别精准且可追溯因果，物理解释性强	训练成本高	[73]	
稳定分析	时域仿真法	PSASP、PSS/E 等软件	实际系统建模经验成熟，场景还原度高	精确建模困难、效率低	[77]	
	直接法	含虚拟惯性的直驱风机系统降阶暂态能量函数	降阶建模简洁，工程解释性好	精度待提升	[78]	
		交直流混联系统暂态能量函数+贝叶斯网络	可评估系统安全性、预测故障路径，计算快于时域仿真	对风电不确定性分析深度不足	[79]	
稳定控制	预决策	映射云在线预决策暂态稳定控制	动态刷新策略表，提升暂态稳定水平，减少人工负担	策略表更新滞后，适应性不足	[83]	
	实时决策	实时短路比+戴维南等值辨识	实现电压支撑强度就地实时监测，支撑新能源消纳	对多类型新能源交互影响的适应性需验证	[84]	
		马尔可夫决策过程+生成对抗模仿学习	离线训练收敛速度提升	拓扑适应性需扩展	[86]	
	调频		模糊模型预测控制	动态调整系数，提升微网频率动态响应	参数整定与稳定性待验证	[91]
			元学习+安全评论家网络	安全与经济性好，高安全性	计算复杂度高	[92]
		多智能体近端策略优化	灵活性好，平衡调频性能与机械安全	通信与协同复杂度高	[93]	

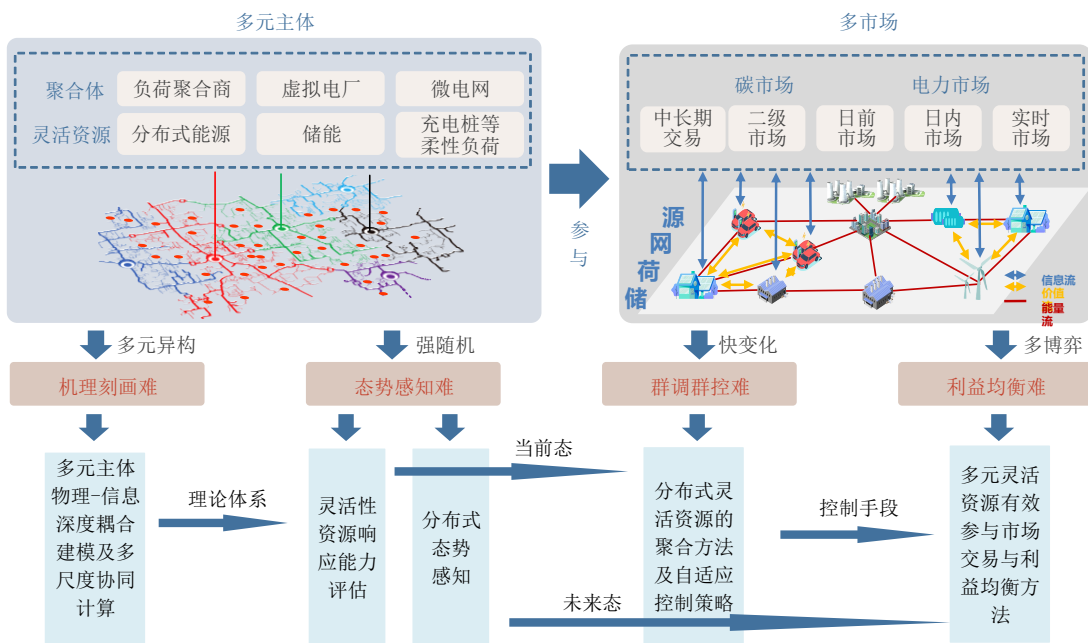


图 3 边侧群控总体技术路线  
Fig. 3 Overall technical roadmap for edge-side group control

### 3.1 多元主体信息-物理耦合建模及多尺度协同计算

随着分布式可再生能源和多样化柔性资源在配电系统中的渗透率越来越高,依托信息通信技术实现智能化主动化控制成为支撑配电系统消纳可再生能源、协调多样化柔性资源的关键,信息通信技术的融合应用为配电系统的运行和控制带来更高的灵活性,势必使其演变为信息-物理主动配电系统<sup>[96]</sup>。文献[97]针对信息物理融合背景下配电网面临的多维不确定性规划难题,提出了一种考虑时空柔性资源与多网络耦合的信息-物理一体化规划模型,通过上层配置-中层迁移-下层拓扑的三层协同优化,实现了规划方案经济性与控制性能的综合提升。文献[98]建立电力市场环境信息-物理社会融合的电力系统优化调度模型,通过即时采集感知-计算分析-决策控制,实现了电力系统全运行域的灵活精准调控和经济优化调度,在促进电力系统对于风电机组消纳的同时,还降低系统整体的运行成本约13.04%。文献[99]考虑了信息-物理协同攻击的不确定性,提出了一种融合信息-物理耦合特性的分布鲁棒协同预防策略,实验证明,该策略在提高信息-物理电力系统的弹性方面具有明显优势。在极端自然灾害发生后,由于配电信息-物理系统中信息侧与物理侧的交互耦合,可协同两侧潜在应急资源,加速系统恢复,为此,文献[100]提出了一种计及快速响应应急资源的配电网信息-物理协同恢复策略,该研究构建了混合通信组网、信息-物理交互与协同恢复的完整模型体系,与传统方法相比,该策略在提升负荷恢复率的同时,加快了资源响应速度并降低了经济成本。文献[101]提出一种分布式自适应鲁棒恢复方案,通过协调优化各类资源,有效应对高影响低频事件,从而增强电网弹性。

在多尺度协同计算方面,针对传统深度学习方法难以解决计算量巨大、频率偏差较大等问题,文献[102]提出了一种新颖的高阶多尺度信息-物理神经网络,该框架通过信息-物理模型的深度融合,实现了对多尺度问题的高效计算,其计算成本较传统神经网络显著降低。文献[103]提出了一种用于电力负荷预测的云边协同深度学习框架,通过在边缘侧集成完整模态分解与变分模态分解算法,实现了负荷数据多尺度特征的提取与去噪,该框架有效地捕捉了电力负荷数据的多尺度时间特征,提高了负荷预测的精度。文献[104]提出了一种虚拟电厂多时间尺度调频控制策略,该策略能够应对不同时间尺度的频率偏差,在三级调频过程中,利用模糊集优化储能调频策略,减少储能开关次数,提高系统的调

频能力。

信息-物理协同控制理论驱动配电系统向信息物理融合演进,是支撑配电系统消纳可再生能源与柔性资源协调的关键。现有研究聚焦信息层与物理层的深度融合,形成了涵盖协同规划、优化调度及灾后恢复的系列模型,为系统经济性、灵活性的协同提升提供了有效支撑,但现有模型对多元主体异构性与行为不确定性的自适应能力不足,难以精准描述分布式决策环境下的复杂博弈关系。多尺度协同优化层面,云边协同深度学习框架、鲁棒模型及虚拟电厂调控等研究为多时间尺度优化提供了解决方案,但多侧重于物理或信息计算的单一方面,缺乏对两者协同计算的系统性研究。

### 3.2 多元多时空特性的灵活性资源响应能力评估与态势感知方法

随着高比例可再生能源大规模并网与新型电力系统建设的持续推进,电力系统灵活性需求呈现出多时间尺度动态耦合、多空间层级双向交互、多资源类型异构协同的显著特征。在此背景下,需求侧灵活性资源(demand-side flexibility resources, DSR)凭借其分布广泛、调节潜力大的优势,已成为新型电力系统源网荷储协调运行的关键调节手段。文献[105]提出了一种考虑时空响应特征的多类型灵活资源配置优化模型,该模型利用灵活性资源与新能源波动之间的多尺度协同机理,指导灵活性不足节点的柔性资源配置。文献[106]引入了一种新的概率灵活性响应指数,通过综合计及结构、控制、通信与聚合因素的不确定性及相互作用,从而精准评估分布式资源性能,实现分布式能源合理性分配。文献[107]提出了一种新的源-荷-储灵活性资源聚合模型,该模型采用分层聚类来增强多能互补性和系统灵活性,使系统响应时间和每日负载波动率显著降低,从而实现优化资源利用率,增强电网稳定性。

随着气候变化,传统的大规模电力系统正面临着越来越多的强随机事件影响,为应对此挑战,研究分布式新能源的动态模式划分与新型配电网的态势感知技术,是精确表征配电网运行状态的有效策略,该研究主要聚焦于典型场景下的动态模式,以及含多元主体的新型配电网,实现对电网状态的精准掌握与未来场景的可靠预测。配电网态势感知控制与保护技术<sup>[9]</sup>的核心是同步量测技术,该技术以同步相量、同步波形、同步行波为关键量测对象,其关键技术包括稳态、动态和暂态各层面的配网态势感知传感技术、配网态势感知控制技术和配网态

势感知保护技术。文献[108]对适用于智能配电网的同步相量测量装置进行研究,并初步提出了配网 PMU 的框架结构、相量测量方法与校准方法。文献[109]针对风电与负荷不确定性导致的电网调峰难题,提出了基于态势感知的峰荷转移优化模型,该模型不仅有效降低净负荷峰谷差率超 39%,在波动环境下也表现出良好的鲁棒性,为提升系统调节能力与经济效益提供了有效方案。文献[110]基于 Petri 网构建了保护设备协同模型,通过模拟不同故障场景,实现了扰动预测与预防控制,在避免连锁故障的同时增强了态势感知水平。文献[111]提出了一种用于配电网负荷预测的全局建模框架,并根据无监督定位机制和最优组合构建策略,将全局预测模型定位到不同的负载特征上,从而实现配电网负荷更精确的预测。文献[112]提出了集成注意力机制的高效神经网络方法,通过挖掘 PMU 数据与电压状态间的关联特征,完成模型的自适应修正,从而实现电压状态的快速、精准感知。文献[113]提出了

一种基于马尔可夫链模型的概率数据驱动电压预测方法,从确定性预测、概率预测和报警系统 3 方面进行检测与评估,从而有效提升配电网态势感知能力。文献[114]将智能电力设备与在线传感、数据挖掘、远程通信和一次/二次融合技术相结合,开发出一种可以实现自主态势感知的智能对象。

上述研究为灵活性资源评估与态势感知提供了多种方法,在资源响应能力评估方面,现有研究虽为 DSR 的多尺度评估提供了理论基础,但普遍缺乏对多尺度耦合下 DSR 互补特性的深入考量,导致难以构建精细化的多维度响应能力评估方法。由表 5 可知,虽然目前阶段的态势感知研究在负荷预测、电压预测和风险评估方面取得了一定成果,但在多元主体的新型配电网环境下仍缺乏态势感知技术的研究与应用,尤其在配电网功率波动的精准预测方面,目前缺乏有效的概率性感知方法,难以获取未来运行场景的概率分布,这些问题为新型配电网态势感知技术的发展提供了方向。

表 5 配电网态势感知策略  
Table 5 Distribution network situation awareness strategy

文献	方法	动机	优点	缺点
[110]	Petri 网建模	协调保护设备,预测未来干扰,防止连锁故障	提高态势感知水平,实现扰动预测和预防控制,增强系统可靠性	Petri 网模型在复杂大电网中可能变得非常庞大,难以构建和维护
[111]	全局负荷预测框架	实现更精确的配电网负荷预测	态势感知能力显著提升,能自适应不同的负载特征,泛化能力强	框架结构可能较复杂,依赖于历史数据的质量和覆盖面
[112]	注意力机制神经网络	实现配电网电压快速、准确的状态估计	利用 PMU 数据,自适应修正,估计精度较高	模型训练计算成本可能较高
[113]	马尔可夫链预测	从多角度(确定性、概率性、报警)提升态势感知能力	提供概率预测和报警功能,能量化预测不确定性,决策信息更全面	马尔可夫链预测可能无法完全捕捉电压变化的复杂动态
[114]	智能集成技术	开发能实现自主态势感知的智能实体	实现了技术融合与集成创新,具备“端”侧自主智能,减轻主站负担	对设备智能化水平和跨技术融合的标准化要求极高,实现成本高

### 3.3 分布式灵活资源的聚合方法及自适应控制策略

在分布式灵活性资源呈现多样性与复杂性的背景下,分布式灵活性资源聚合与聚合体优化运行技术成为应对上述挑战的核心技术途径之一。为快速准确表征海量分布式资源的功率调节能力,文献[115]依次通过资源分类、计及不确定性的高斯混合建模、基于顶点枚举与二元一致性算法的电压约束构造,系统性地提出了资源聚合与聚合体优化运行的集成框架。文献[116]提出一种 DER 动态协调规划方法,通过建立概率框架量化源-荷不确定性,并基于软开放点调整网络架构,实现了灵活配电网在长期规划中投资效率与运行风险的平衡。文献[117]针对不确定资源带来的灵活性调整需求,提出了一种基于奇诺多面体的负载侧资源灵活性集群划分方法,能够充分发挥负荷侧资源的灵活调整能力,有效平衡聚合精度和计算速度。而且 DER 的不确定性聚合表征对于电力系统的有效决策和控

制至关重要,为此,文献[118]提出了一种云-边-端协作方法来量化多时空 DER 发电的聚合不确定性。

分布式资源渗透率持续升高引发的强随机无序特性,导致配电网电压波动加剧与越限风险凸显,驱动边缘计算技术支撑的区域自治自适应控制成为提升系统稳定性的关键方向。文献[119]研究了配电网多馈线负荷协同的直控型虚拟电厂自动功率控制策略,实现了对自动功率控制指令的主动跟踪。文献[120]提出了基于多智能体深度强化学习的分布式电源电压控制框架,该框架通过在各区域部署智能体以实时感知电网状态并制定运行策略,实现了对电压波动的自适应调节,从而显著改善了电压偏差,提升电压运行质量。文献[121]提出一种基于拓扑结构自适应潮流元模型的配电网电压控制方法,在 IEEE33 节点系统和 IEEE37 节点系统下,使用该策略方法使电压偏差分别降低了 23.04%和 44.72%,提升了配电网电压控制灵活性,有效提升

系统的电压安全。针对频繁电压越限与运行网损增大的问题,文献[122]提出了一种知识-数据融合的自适应控制方法,该方法通过将领域知识嵌入数据驱动模型,实现了对 PV 逆变器电压/无功的精准优化控制。文献[123]提出了一种基于逆变器电压-无功控制的新型深度强化学习框架,能够自动适应不断变化的分布网络环境。文献[124]提出了一种电压优先的实时感知自适应深度神经网络增强方法,实现在电动汽车密集型配电网中对母线电压的实时、高精度感知。

上述研究虽为 DER 聚合建模提供了众多简化计算、精确建模与动态适应性提升的方法,但在 DER 接入量大幅提升的背景下,仍需研究能够有效权衡计算效率与精度的资源聚合方法。同时,为应对能源转型下的配电网中灵活性资源的复杂性与不确定性特征,还需分析不同种类资源之间的差异性,以获取贴合实际的建模效果。在 DER 自适应控制方面,现有的研究针对分布式能源接入、拓扑优化和无功优化问题,为配电网区域电压自适应控制及自治运行提供了多种解决方案。然而,通过梳理现有方案可以发现,其控制目标多集中于维持基波电压水平在合格范围内,所建立的模型与算法普遍未将谐波电压约束或谐波失真率作为核心优化目标<sup>[125-126]</sup>。特别是在涉及大量电力电子接口设备的场景下,谐波对电压控制回路、传感器测量精度以及系统稳定性的影响尚未得到系统性的分析与解决。

### 3.4 多元灵活资源有效参与市场交易与利益均衡方法

多元灵活资源的高效市场参与及利益均衡是实现电力系统经济优化运行的关键环节。现有研究聚焦于开发先进的交易机制与公平的收益分配策略,以应对市场波动性、提升资源利用率并保障参与者长期合作。目前,常用的市场交易方法包括 Shapley 值法和纳什议价法,文献[127]引入基于 Shapley 分配的合作博弈,分析合作联盟视角下点对点(point to point, P2P)市场主体可能的交易策略及潜在的利益关系,但该方法计算规模大、求解时间长的问题限制了其在大规模分布式交易中的应用。文献[128]提出了一种基于改进纳什议价法的多微网交易机制,能够鼓励各微网参与合作。尽管纳什议价理论能够通过谈判实现多方利益的均衡分配,但传统纳什议价方法中参与者分配到的收益相同,无法体现不同贡献者的差异性,导致分配结果缺乏公平性。针对上述问题,文献[129]提出了基

于纳什谈判的多微网 P2P 交易模型,该策略在多微电网合作中能够实现整体性能的提升,有效促进了可再生能源的消纳水平,通过动态调整收益分配策略,实现了公平的效益分配。

在利益调整策略研究方面,公平合理的收益分配机制是确保产消者长期合作的关键。为了体现不同贡献者的差异性和分配结果的公平性,文献[130]研究了多能源微电网中联合 P2P 电力和碳交易的优化问题,实现最大限度地降低运营成本,在减少可再生能源浪费的同时确保多能源微电网之间交易策略的公平性。文献[131]提出了一种考虑差异化电能质量的工业用户参与电力和碳市场的决策模型,利用信息差距决策理论描述分布式可再生能源发电的不确定性,在降低工业用户决策风险的同时,有效减少了碳排放,实现了用户综合效益的优化。然而,本地能源市场在分布式能源整合中的基础性作用仍不足以有效激励用户参与,文献[132]提出了一种概率优化竞价策略,通过构建多市场条件下的收益贡献整合模型,确保各方贡献得到合理回报,基于实时市场反馈设计动态激励机制,提升模型的适应性和公平性。

现有的研究虽然在多元灵活资源市场交易机制和利益分配方面取得一定的进展,但交易策略自适应优化方法的实时性和动态性不足,传统的 Shapley 值法和纳什议价法难以应对市场波动和需求变化,同时利益调整策略研究缺乏系统性和可操作性,未能充分考虑多主体间的利益冲突与协同需求。

边侧群控技术作为“云-边-端-芯”核心控制技术之一,为电力系统向高弹性、高可靠性转型提供核心支撑。边侧群控技术主要研究领域有以下 4 个方面: 1) 在信息-物理耦合建模及多尺度协同计算领域,通过信息层与物理层深度耦合建模、云边协同深度学习、高阶-物理神经网络等方法,有效提升了系统的运行效率和动态响应能力,但现有方法对信息-物理跨域协同的计算融合深度仍有不足。2) 在资源响应能力评估与态势感知领域,通过多尺度资源评估与配置模型,实现了灵活性资源的精准评估与优化分配,借助智能态势感知技术,有效提升系统状态感知与预测能力,但目前研究对资源互补特性的考量不足,且在功率波动预测中缺乏有效的概率化感知手段。3) 在资源聚合及自适应控制领域,依托动态协调规划、集群划分等高效资源聚合方法,并采用自适应控制策略,在保证精度的同时平衡了计算效率,有效抑制电压波动并提升系统稳定性,但在处理大规模资源时效率与精度的平衡仍

需优化。4) 在资源有效参与市场交易与利益均衡领域, 通过构建 Shapley、纳什议价等多种市场交易机制和利益分配模型, 提升资源利用效率与交易公平性, 但多元聚合体最优决策机制尚不完善, 交易策略自适应优化的动态响应能力不足, 利益调整策略的系统性与可操作性有待加强。

未来, 边侧群控技术将向更高层次的智能协同与自主决策演进。通过深度融合信息物理系统与人工智能技术, 边侧节点将具备更强的环境感知、协同计算和自主调控能力, 实现区域设备的智能协同与动态优化。依托多时空尺度的概率化态势感知体系, 发展谐波约束下的电压协同控制策略, 为构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系提供坚实的技术基础。

## 4 端侧数控技术

端侧数控是支撑现代电力系统安全、高效、灵活运行的核心技术, 为数字电网终端设备的智能化运行提供了支撑<sup>[15]</sup>, 在分布式电源、电动汽车充电桩大规模接入时, 能动态平衡局部电网供需, 为“源网荷储”协同和碳中和目标落地奠定基础。控制层面上, 端侧数控技术包括感知环节、决策环节以及控制环节。其核心是基于数据驱动, 构建适配新型配电系统的端到端控制基础软件框架。借助群体智能协同决策与控制等关键技术, 让设备具备“自感知-自决策-自控制”能力, 精准调控从公共电网变电站到用户侧各类设备(如工业负荷、光伏等), 从而优化配电运行策略, 提升电力系统智能化、精细化管理与运行水平, 实现高效、精准的电力分配与控制。

### 4.1 端侧数控技术关键方法

#### 1) 数据驱动技术。

电力系统端侧数控需实现从调度指令到设备执行的全链路精准控制, 但电网负荷波动、新能源出力随机、设备老化等动态因素, 易导致预设控制模型失效。数据驱动技术通过采集调度指令、设备状态、电网参数等全链路数据, 可构建动态控制模型, 实时修正控制策略。此外, 数据驱动支持端到端自适应调节, 减少人工干预, 在保障供电稳定性的同时提升响应速度, 是电力系统端到端数控应对复杂工况、向智能化升级的必要条件。文献[133]提出了一种碳感知微电网调度的端到端学习方法, 该方法将预测和优化无缝集成到单个神经网络中, 使整个过程与最小化运营成本的目标保持一致。通过“端到端整合”和“碳约束嵌入”, 在精度、效

率和低碳性上优于传统调度。文献[134]利用神经网络建立了电价预测模型, 提出了一种考虑电池退化成本的储能系统套利端到端电价预测方法。文献[135]通过将物理模型整合到机器学习流程中, 提出了通过神经网络预测器预测隐藏奖励值, 优化层利用该隐藏奖励值求解优化问题来计算决策的端到端方法, 为储能优化与行为预测提供了实用框架。

#### 2) 群体智能协同决策。

电网含大量分布式电源、储能及负荷, 单一节点决策易陷入局部最优。群体智能协同决策通过多主体(如区域控制器、设备节点)数据共享与协同推理, 能整合全局电网状态。这种协同模式弥补了端到端数控中单一节点算力与视野的局限, 确保控制指令兼顾全局稳定性与局部经济性。

基于群体智能算法在电力系统端侧多设备协同决策方面的研究, 将电网中多个分布式主体(如分布式电源、储能设备、负荷聚合商、微电网等)视为“智能体”, 通过预设规则、局部信息交互和自主决策, 协同完成电网运行优化、故障恢复、新能源消纳等复杂任务的决策模式。其核心是“去中心化协同”无需依赖集中式控制中心的全局指令, 而是通过个体间的信息共享和动态博弈, 实现全局频率稳定、电压平衡、经济运行等目标。文献[136]通过分层控制和改进荷电状态(state of charge, SOC)算法, 有效平衡了微电网的独立性与协同性, 在电压稳定、能量利用和鲁棒性上表现优异, 适合中小型直流微电网集群应用。文献[137]提出一种群体智能决策方法, 以“自信度”和“共识度”为核心量化指标, 精准捕捉决策者心理特征与群体一致性, 通过量化指标和信息筛选提升决策质量, 尤其适用于需要平衡群体一致性和信息可靠性的场景。文献[138]探究了5种决策风格、任务知识和认知能力对群体决策绩效的影响, 揭示了个体决策风格对群体绩效的调节作用。

#### 3) 设备自感知-自决策-自控制。

电网存在新能源剧烈波动、负荷突变等动态干扰, 中心控制易因延迟导致响应滞后, 设备通过自感知实时捕捉电压、电流等状态数据, 自决策模块基于本地数据快速生成调节策略, 自控制功能即时执行调整, 可在毫秒级内应对扰动。这种本地化闭环能力, 避免了端到端链路中数据传输与中心决策的延迟。同时, 自感知-自决策-自控制能减少对全局通信的依赖, 在极端工况下仍保持局部稳定, 为端到端数控提供底层支撑, 保障了高比例新能源电网下供电连续性。文献[139]提出了一种基于改进

DQN 算法的中低压配电设备故障自平衡控制方法,在故障识别精度和控制资源优化上表现突出,能有效降低配电设备故障频率及影响。文献[140]通过双层优化和策略整合,有效平衡了配电网自愈能力与经济性,在典型场景下表现优异。文献[141]通过混合算法和自主控制架构,在电压稳定、算法效率和损耗控制上表现突出,适合中低比例分布式光伏接入场景。

端侧数控技术以数据驱动、群体智能协同、设备自感知决策控制等实现电力系统智能敏捷控制。数据驱动提升响应与适应力,但鲁棒性和数据质量存在瓶颈;群体智能突破算力局限,需解决通信与效率问题;设备自控制支撑系统的扰动抑制,需强化场景适应与参数整定能力。

#### 4.2 端侧数控技术在不同场景的应用

在电网安全运行场景中,端侧数控技术实时捕捉线路温度、设备状态等数据,当变压器过载时自动调节负荷分配,遇短路故障则毫秒级隔离故障段并切换备用回路,筑牢供电防线;面对分布式能源,其可动态平衡新能源出力;在用户互动场景,通过智能终端连接用户设备,高峰时推送电价激励引导错峰用电,供电紧张时远程调控商业楼宇空调等可调节负荷;还能响应充电桩集中接入需求,动态分配台区容量,避免局部电网过载。

在电网稳定性保障应用场景方面,文献[142]提出了电网电压不平衡下基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)转子侧变换器控制方法,且 VSG 电流内环采用了非线性无源性控制策略,在电网不平衡时能有效平衡电流与功率稳定性,兼顾频率支撑能力,适合中低比例负序电压场景,但需简化控制结构、增强量测容错性,并优化宽工况适应性,以提升工程实用性。文献[143]针对端侧设备的运行需求、控制逻辑,提出了级联变流器系统稳定性分析方法,通过场景化优化响应端侧多样化需求,体现端侧设备从“功能实现”到“高效可靠运行”。

在分布式能源调控的实际应用场景中,文献[144]提出集成多元储能的分布式能源系统技术框架,端侧聚焦酒店、办公楼等用户的冷、热、电及生活热水多元负荷需求,构建耦合可再生能源的源储荷一体化冷热电储系统,该系统端侧涉及多类型设备耦合,设备间协同控制逻辑复杂,数控层面极端天气下负荷预测精度易受干扰,且动态调控策略对多时间尺度响应的适配性仍需完善。文献[145]

针对高渗透率分布式能源导致的电网惯性与调频能力下降问题,提出了基于社区虚拟电厂的决策框架,通过多智能体强化学习优化虚拟电厂的能源调度与市场投标策略,突破了虚拟电厂在信息隐私约束下的决策难题,兼顾经济性与电网服务能力。

对于用户侧互动响应应用场景,文献[146]提出区块链技术和动态优先级控制,在数据安全和需求响应精度上表现突出,适合规模化用户侧场景。文献[147]针对需求侧能源管理中的用户用电量预测及节能建议问题,提出了基于机器学习的集成系统,通过随机森林预测用电量、决策树生成个性化节能建议,满足用户侧用能需求。

针对端侧数控技术的应用场景,其端侧数控在电网安全、分布式能源、用户互动中均具有具体应用。相关文献针对电网稳定、分布式能源调控、用户侧响应等,提出 VSG 控制、多元储能等方法,虽解决对应问题,但在结构简化、工程实现等方面仍需优化。

整体而言,端侧数控技术的核心方法包含 3 类: 1) 数据驱动技术通过采集全链路数据构建动态控制模型,能实时修正策略以应对电网动态变化。相关文献提出的碳感知调度、电价预测等方法在效率与适应性上表现突出,但受数据质量和极端场景鲁棒性制约; 2) 群体智能协同决策以“去中心化协同”模式,使得分布式主体通过信息共享实现全局优化,如用户源网荷储协同运行等方案提升了经济性与稳定性,不过存在通信开销和参数适配问题; 3) 设备自感知-自决策-自控制通过本地化闭环响应,可毫秒级应对扰动,故障自平衡控制、离网微电网能量管理等案例验证了其价值,但需强化复杂场景适配性。

未来,端侧数控技术将具备更强的自主判断和决策能力,结合无人值守、智能维护技术将更好地提升设备运行的稳定性和维护效率。伴随着电力物联网的深化应用<sup>[148]</sup>,依托物联网传感器和通信技术,端侧数控技术将实现设备间的实时互联与协作,提高电网的控制水平,实现分布式新能源充分消纳和电网安全稳定运行。

## 5 芯侧智控技术

当前人工智能技术快速发展,其在电力系统中的应用也愈发深入,然而人工智能在电力场景中存在“模型复杂”与“硬件受限”的矛盾,人工智能模型普遍存在参数维数大、存储空间需求高、推导耗时长、能耗高等问题,而传统电力芯片算力有限,

无法满足故障诊断、紧急调度等对快速响应有极高要求场景的需求。因此，该技术聚焦于新型电力系统芯侧，突破数字电网嵌入式设备算力瓶颈，为数字电网实时决策与控制提供底层算力支撑<sup>[149]</sup>，通过技术创新实现对海量多模态数据及复杂应用场景的高保真处理、轻量化建模、低功耗运行，覆盖人工智能模型的构建、推理与决策全流程，并重点攻关数据预处理、模型轻量化、实时控制与决策等关键环节。

### 5.1 数据预处理

计量、生技、调度等领域网关作为数字电网端侧量测与数据交互的核心设备，针对接入大规模分布式新能源的配电系统开展量测工作，具备采样间隔短、量测精度高的技术特性；依托微型同步量测信息，在特定精准量测时刻，对 PMU、SCADA 及高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)的多源量测数据进行预处理，为后续电网智能

分析提供高质量基础数据。

依托 PMU 数据，文献[150]通过 Prony 算法在线识别低频、超低频振荡，结合振荡功率、谐波电压等判断次同步振荡，能有效监测各类振荡并及时告警，为电网稳定运行提供支持，但依赖 PMU 数据传输的连贯性。针对 SCADA 系统数据的量测，文献[151]通过多源数据融合和混合架构构建知识图谱，有效解决了 SCADA 系统数据整合与关联分析的问题，在智能搜索和决策支持中表现突出。文献[152]针对 SCADA 系统面临的针对性网络攻击，提出了基于深度强化学习的异常检测框架，通过“Q-network”实现复杂任务的模式识别，提升工业控制系统的防御能力。针对 PMU、SCADA、AMI 等多类型数据源的整合，文献[153]提出了一种多源数据融合方法，构建 SCADA 系统知识图，实现 SCADA 系统的多源数据融合与知识图的构建、准确的检索和决策支持。数据量测体系对比如表 6 所示。

表 6 数据量测体系对比

Table 6 Comparison of data measurement systems

量测体系	量测对象	数据核心特性	预处理核心目标
PMU	发电机、枢纽变电站等关键节点的相量信息(电压/电流相量、频率、功角)	高频(25~100 帧/s)、高精度(同步误差 $\leq 1\mu\text{s}$ )、强实时性	确保数据的时间同步性和高频完整性，为暂态稳定分析、故障定位等实时控制提供可靠输入
SCADA	全网断路器、隔离开关、主变、线路等设备的运行状态与稳态量	中高频(1~60s/次)、稳态性、多源异构	修正数据的稳态偏差和时空不一致性，为调度中心的稳态监控、负荷预测、经济调度提供干净数据
AMI	用户侧的用电细节数据	低频(15min h/次~1h/次，部分可达秒级)、海量性(100 万级用户)	清洗数据的噪声与异常值，为需求响应、用户用电分析、电费核算提供精准用户侧数据

对 PMU、SCADA、AMI 等多源数据预处理是智能分析基础。现有研究中这些数据应用各有进展，但在实际应用中仍面临数据质量参差不齐、计算资源需求高、多源异构数据深度融合困难等挑战。未来需突破数据异构性等瓶颈，开发自适应算法并融合边缘计算，提供高质量数据支撑。

### 5.2 模型微型化

模型微型化是针对电力系统芯片算力与存储资源有限的问题，通过修剪、量化、知识蒸馏等技术对神经网络模型进行轻量化处理的方法。修剪通过移除模型中冗余的神经元或连接，在减少参数数量的同时避免核心特征丢失；量化将高精度权重转换为低精度格式，降低计算复杂度与存储占用，同时通过误差补偿维持推理稳定性；知识蒸馏则以复杂教师模型的输出为监督，训练轻量学生模型，保留关键决策知识。这些技术在减少模型参数和计算量的同时，能最大限度保证推理的准确性，使其适配电力系统芯片的硬件约束，为端侧实时分析提供可行的算法支撑。

神经网络模型修剪的核心，在于既要精准地识

别并移除冗余参数，也要稳定地保持模型的原有性能。该方法具有针对性减参、硬件适配性强、灵活性高等特点。文献[154]针对深度卷积神经网络的滤波器剪枝问题，提出了一种动态控制全局剪枝率的结构优化方法，通过滤波器相似性度量和全局均衡的剪枝策略，在提升模型压缩与加速效果的同时，减少精度损失，缓解了传统滤波器剪枝技术中精度损失与压缩效果之间的冲突。文献[155]提出了一种结合结构化剪枝与缩放策略约束的深度强化学习模型优化方法，解决了嵌入式系统中深度强化学习模型的计算效率与性能平衡问题。

神经网络模型量化核心要点在于“精度压缩”与“性能补偿”的平衡，其具有高效降载、部署友好、可控性强的优点。文献[156]考虑大多数嵌入式系统采用 8 位整数处理时性能更优，提出一个统一的 8 位推理与训练框架，支持目标检测任务，在保持传统卷积神经网络精度的同时兼顾运算速度。文献[157]通过“序贯投影+轻量暂态约束”，在保证计算效率的同时实现了转子角稳定与电压稳定的分步优化，兼顾实用性与经济性，为电力系统预防控

制提供了轻量化解决方案。

知识蒸馏的核心是将复杂模型的“知识”迁移到轻量模型中，其具有知识保留完整、泛化能力强、适配性广的特点。文献[158]介绍了一种基于知识蒸馏的神经网络冗余减少方法，通过通道对比和差异知识挖掘，有效解决了传统蒸馏中特征冗余和过拟合问题，在性能和适应性上超越主流方法，尤其适合资源受限设备上的模型压缩。文献[159]针对连续识别模型的实时性问题，提出了基于跨分辨率知识蒸

馏和轻量化网络的解决方案，通过教师-学生网络架构，在保证识别精度的同时降低模型参数与推理耗时。

模型微型化技术通过修剪、量化与知识蒸馏等方法，有效缓解了电力系统嵌入式芯片在算力与存储方面的资源约束，如表7所示，现有研究在模型轻量化与精度保持的平衡方面已取得显著进展，但仍面临诸如精度损失、硬件兼容性及动态场景适应性等共性挑战。未来需融合多技术并结合电力场景动态调整，提供可靠轻量化模型支撑。

表7 模型微型化方法对比

Table 7 Comparison of model microscaling methods

方法	应用	文献	特点
神经网络模型修剪	用于深度卷积神经网络滤波器剪枝，提升大型网络压缩、加速效果且精度损失小	[154]	聚焦“精准识别冗余”与“稳定性能保留”，针对性减参、硬件适配性强、灵活性高
	解决嵌入式系统中深度强化学习模型计算效率与性能平衡问题	[155]	
神经网络模型量化	针对嵌入式系统目标检测任务，平衡模型精度、部署效率及成本	[156]	核心在“精度压缩”与“性能补偿”平衡，高效降载、部署友好、可控性强
	为电力系统预防控制提供轻量化解决方案	[157]	
知识蒸馏	减少神经网络冗余，适合资源受限设备模型压缩	[158]	核心是复杂模型“知识”向轻量模型迁移，知识保留完整、泛化能力强、适配性广
	解决连续识别模型实时性问题	[159]	

### 5.3 实时控制与决策

电力系统实时控制与决策对芯侧控制的必要性体现在硬件支撑与动态响应的深度耦合上。随着分布式新能源大规模接入，电网功率波动加剧、拓扑动态变化频繁，需毫秒级响应处理电压暂降、线路过载等突发状况，这要求控制指令从感知、计算到执行的全链路低延迟。面对新能源的不确定性，实时决策算法从传统确定性优化向鲁棒优化、随机优化及人工智能融合方向快速发展。文献[160]提出基于深度强化学习与鲁棒优化融合的多目标调度方法，降低经济成本，并使数据驱动的不确定性处理更精准。文献[161]针对风电场群并网功率超限及共享储能电站内部储能单元充放电状态异常问题，提出了两层在线优化控制策略，通过指令功率决策优化层和指令功率分配层的协同，结合储能健康状态评估实现高效控制。

根据以上研究说明，应对高比例新能源接入带来的实时性挑战，电力系统的控制与决策既要依托芯侧硬件实现毫秒级的快速响应，也要借助先进算法实现不确定环境下的精准决策。

总而言之，芯侧智控技术聚焦数据预处理、模型微型化、实时控制与决策三大核心方向，各环节均有具体技术路径与实践局限。数据预处理方面，针对PMU、SCADA、AMI等多源数据，现有方法已实现特定功能，PMU数据通过Prony算法可监测低频振荡<sup>[150]</sup>，SCADA数据借助基于深度强化学习的异常检测框架检测针对性网络攻击<sup>[152]</sup>，多源数据通过知识图谱实现整合检索<sup>[153]</sup>。但实际应用中，

PMU依赖数据传输连贯性，SCADA受未知攻击泛化性限制，多源整合仍难解决异步采样等问题，需突破异构性瓶颈；模型微型化通过修剪、量化、知识蒸馏适配芯片资源，修剪可移除冗余神经元，量化能将高精度权重转低精度格式，知识蒸馏可迁移教师模型知识，不过这些技术存在精度损失风险，需结合电力场景动态调整策略；针对新能源接入下实时控制与决策的技术挑战与优化方法，现有研究通过深度强化学习与鲁棒优化融合方法可平衡调度鲁棒性与经济性，云边协同算法能实现低压配网实时决策，但存在计算复杂、部署成本高等问题，需进一步优化。

未来，需融合多种技术形成协同方案，结合电力场景需求动态调整轻量化策略，为电力系统实时分析提供更可靠的轻量化模型支撑。芯侧智控技术框架如图4所示。

## 6 新一代数字电网先进控制技术总体框架与研究思路展望

随着高比例新能源接入，新型电力系统正向着多层级资源协同互动转型，新一代数字电网呈现出源荷双侧强不确定性、控制对象海量、响应需求实时化等核心特征<sup>[162]</sup>。在此背景下，既有研究围绕先进控制理论及“云-边-端-芯”分层控制技术开展了广泛探索。在理论层面，先进控制理论涵盖有模型控制与无模型控制，具体体现在如全驱系统、神经网络及自适应控制等前沿方向，为非线性、非光滑、时变性电力系统场景提供了理论基础；在技

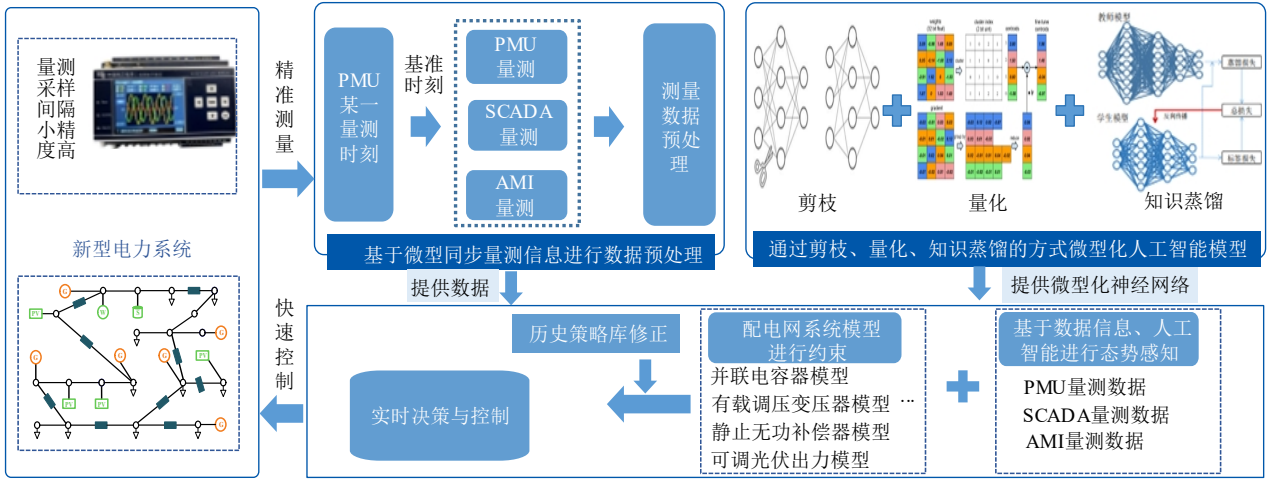


图4 芯侧智控技术框架

Fig. 4 Chip-side intelligent control technology framework

术实践层面，云侧稳控聚焦全域资源调度与稳定决策，边侧群控实现分布式资源协同优化，端侧数控强化终端精准控制能力，芯侧智控突破嵌入式轻量化推理瓶颈。然而，现有成果呈现显著的碎片化特征：理论体系缺乏统一框架，层级技术孤立研发导致协同不足，难以支撑新型电力系统百万级资源的高效协同调度与毫秒级实时响应。具体而言，云侧稳控在应对高比例新能源强随机性时面临实时计算负担过重、大规模电网仿真效率低下以及复杂紧急控制决策时效性不足的挑战<sup>[68,72]</sup>；边侧群控在实现分布式资源高效聚合与协同时，受限于多元主体物理-信息耦合建模系统性不足、市场交易机制适应性弱以及区域控制策略在动态协同与谐波抑制方面的效能瓶颈<sup>[97,127]</sup>；端侧数控在保障设备级精准快速响应方面，仍受限于数据驱动模型的鲁棒性、群体智能的通信成本，以及复杂场景下设备自控制参数整定的难度<sup>[140,143]</sup>；芯侧智控则需克服数据预

处理对多源异构整合的适应性限制、模型微型化带来的精度损失风险以及实时控制决策算法在复杂场景下的计算效率瓶颈<sup>[152,155]</sup>。

为此，本研究提出基于“1+4+N”的新一代数字电网先进控制技术总体框架，如图5所示。该框架采用“系统全局优化-区域自治运行-节点主动支撑-芯片算法策略”的分层协同架构，其核心脉络在于以一套融合创新的先进控制理论为基石，系统性整合传统控制、现代控制与智能控制的前沿理论，构建覆盖全驱系统模型分析、物理信息神经网络、自适应控制设计的完整体系；通过融合多时间尺度场景模拟与运行优化，深度解构电力强非线性非光滑时变性场景的特性，突破传统控制方法在新能源高渗透环境下的应用瓶颈，为复杂工况下电力电子设备稳定控制、系统振荡抑制及电网动态调节提供普适性理论支撑，奠定全场景适应性的技术根基。

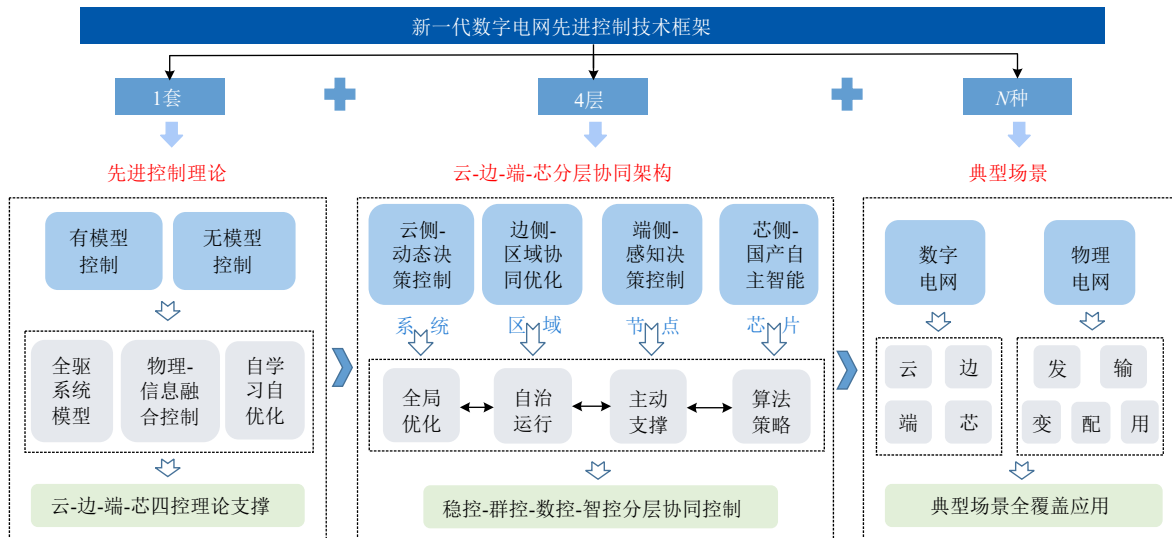


图5 新一代数字电网先进控制技术框架

Fig. 5 Advanced control technology framework for the new generation of digital power grid

在控制技术层级上，“稳控-群控-数控-智控”四级技术体系实现全域协同优化。如图 6 “云-边-端-芯”分层协同控制框图所示，云侧稳控层依托电力大模型驱动数字孪生体，集成 SCADA/PMU/设备状态多源异构数据，通过扩展卡尔曼粒子滤波与图神经网络联合的动态状态估计实现高精度感知<sup>[66]</sup>，结合自适应多源数据融合框架构建安全稳定边界与承载力评估模型；采用暂态能量函数法构建系统能量函数评估稳定性<sup>[78]</sup>，运用在线预决策机制优化稳定控制策略，并融合深度强化学习算法实现场景模拟、运行方式优化与稳定函数动态决策，支撑系统级调度，为全域资源协同提供顶层优化决策<sup>[163]</sup>。边侧群控层聚焦云边协同机制，将系统层安全控制指令解耦为区域级调度策略，基于多智能体协同群控技术实现分布式资源动态聚合，运用高斯混合模型建立计及不确定性的分布式电源模型<sup>[115]</sup>，通过内逼近法完成灵活性资源集群划分<sup>[116]</sup>，实现跨域优化控制，结合同步量测、Petri 网故障预测与 AI 电压预测等态势感知技术实现高精度状态评估与波动平抑，进而达成区域自治运行目标，显著提升配电网分布式资源响应效率与协同可控性。端侧数控层构建端到端控制基础框架，依托光纤/5G 双通道控制指令传输，由端侧数控终端执行设备级精准控制，通过端到端学习方法实现控制决策的动态优化，基于源网荷储协同运行策略实现群体智能协同决策<sup>[135]</sup>，采用改进 DQN 算法构建故障自平衡控制机制<sup>[140]</sup>，结合规则库策略完成本地快速响应，进

而实现新能源高渗透配电网的电压越限抑制、台区协同与故障快速恢复等主动支撑功能，完成节点级“感知-决策-执行”精准闭环控制。芯侧智控层通过内置轻量化推理引擎，运行基于滤波器相似性度量全局剪枝的微型 AI 模型<sup>[155]</sup>，采用训练后量化与知识蒸馏技术压缩模型规模，结合增量元学习算法实现参数在线持续优化，在嵌入式资源约束下实现就地高保真决策，支撑终端设备快速响应控制指令，为终端就地智能控制提供核心算力支撑。

研究思路的深化将聚焦多维度融合创新：

1) 在理论层面，需持续发展物理机理与数据驱动双轮驱动的混合智能控制范式，以弥合传统模型驱动对精确数学表征的依赖与数据驱动方法在复杂场景泛化性和物理可解释性方面的不足，尤其需要进一步开发全驱系统理论在分布式新能源控制领域的模型构建能力，利用其通过建立全驱模型“以控制向量为主角”的核心优势，构建更适应电力电子设备主导系统动态特性的分析模型；同时，加强神经网络结构中电力微分方程的嵌入，将反映电力系统物理规律的微分代数方程作为约束或先验知识融入神经网络架构，从而提升复杂工况下控制策略的物理可解释性与泛化能力，解决纯数据驱动方法的黑箱特性挑战。

2) 在技术实现上，云侧重点发展电力系统态势感知与稳控分析决策技术，优化基于机器学习的在线决策机制，通过融合深度强化学习与鲁棒随机优化方法，突破传统预决策系统仅支持有限运行模

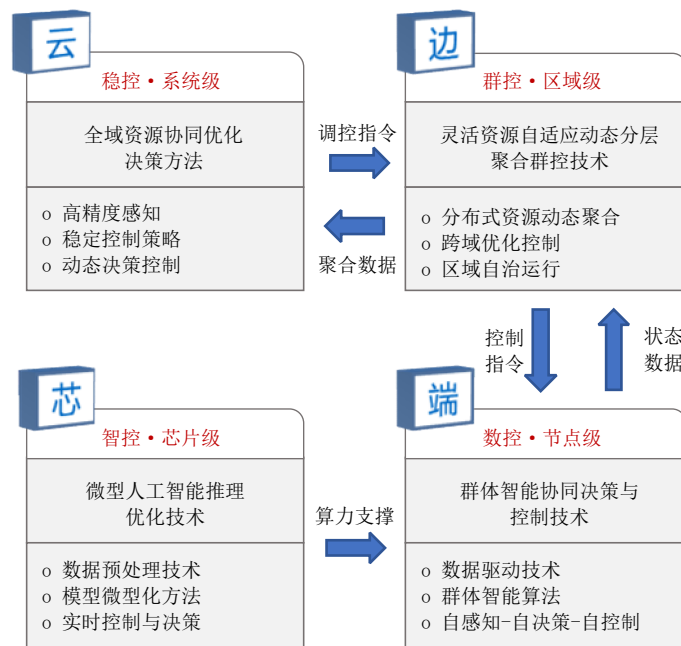


图 6 “云-边-端-芯”分层协同控制框图

Fig. 6 Cloud-edge-end-chip hierarchical collaborative control block diagram

式的局限,并依托分布式计算架构加速安全边界建模与裕度评估,提升在极端新能源场景下实时计算的效率与精度;边侧探索分布式资源动态聚合群控技术,重点攻克多元异构资源在电力-碳耦合市场中的协同优化难题,建立兼顾谐波抑制、电压调节与经济调度的多目标协同框架,构建基于区块链智能合约的交易验证体系,确保海量分布式主体在跨区域交易中的利益均衡与策略可信;端侧突破终端设备精确感知、自主决策与快速控制技术,通过深化群体智能协同决策机制优化分布式资源动态响应效率,并依托数据驱动的动态控制模型提升新能源波动场景的适应性,同时构建自适应的参数整定策略,显著增强对电压越限、频率波动的抑制能力,彻底消除复杂工况下的响应延迟风险;芯侧研发大模型知识蒸馏与轻量化推理的动态协同架构,针对嵌入式设备算力有限性与复杂 AI 模型需求间的矛盾,通过教师模型的知识迁移机制,并结合动态量化与修剪技术,在资源约束下实现高保真推理与毫秒级响应,突破传统方法在复杂场景中的实时性瓶颈,同时优化跨层级控制指令的实时转化效率,加强进化智能体技术攻关,针对传统方法在面对新能源波动、负荷变化等动态环境时自适应能力不足和收敛性问题,通过设计能够在系统运行过程中持续、高效地利用新数据更新控制策略的增量学习机制,最终实现控制器在线持续优化。

3) 在工程应用维度,亟需推动国产化软硬件研发及协同验证平台建设,深度融合“云-边-端-芯”分层控制架构,构建覆盖全域资源协同的闭环测试环境,针对电力、工业等领域,开展  $N$  类典型场景的规模化示范,验证技术体系的经济性与可靠性,形成“技术研发-平台验证-场景示范-标准输出”的完整转化机制,加速技术成果向工业自动化、智慧交通等高协同性领域的渗透迁移。

未来研究需立足“理论-技术-应用”突破,布局跨域协同控制标准体系构建,深化新型电力系统多时间尺度控制耦合机理研究。通过构建自主可控的先进控制技术生态,为能源、工业、建筑、交通等多行业的数字化转型提供核心引擎。

## 7 结语

在“双碳”战略驱动下,新型电力系统面临高比例新能源接入引发的新能源充分消纳和电网安全稳定运行的核心挑战。本文聚焦有模型与无模型先进控制理论,深入剖析“云-边-端-芯”协同框架下的“稳控-群控-数控-智控”先进控制技术体系,

形成了具有工程实践价值的“1+4+N”架构。

1) 先进控制技术通过融合数学机理与智能算法,构建模型驱动与数据驱动的混合范式以协调多层级设备动态,能够有效解决新能源场景下的非线性振荡与多目标冲突问题,实现“源-网-荷-储”资源的高效协同,然而混合范式在极端复杂运行工况下的泛化能力存在不足,多目标优化过程中各控制目标间的相互制约关系尚未得到有效解决,制约了系统整体性能的进一步提升。

2) 云侧稳控技术依托电力大模型集成 SCADA/PMU 等多源数据,实现全域态势感知与动态安全边界建模,其机器学习驱动的在线决策机制支持省级电网高效响应,显著提升高渗透新能源系统的主动防御能力,但面对高比例新能源接入带来的快速功率波动,现有算法的计算复杂度较高,难以满足大规模电网实时决策的时效性要求,极端工况下的适应性仍需加强。

3) 边侧群控技术采用多智能体协同机制解耦云层指令,优化配网资源的动态聚合与跨域交易效率,通过物理-信息耦合建模增强分布式资源响应灵活性,然而现有建模方法对物理系统与信息系统的交互机理刻画得不够深入,难以有效应对复杂市场环境下多元主体间的博弈行为,限制了协同控制效果的进一步提升。

4) 端侧数控技术依托“感知-决策-执行”闭环结构,通过高速通信通道实现设备级精准调控,数据驱动与群体智能技术赋予终端自适应能力,使其能够在新能源高渗透场景自主抑制系统扰动,但分布式协同控制对通信资源要求较高,并且群体智能算法收敛较慢、参数难以自适应调整,从而制约了控制系统动态响应速度的提升。

5) 芯侧智控技术基于轻量化推理引擎突破嵌入式算力瓶颈,支持终端设备就地高保真决策,通过模型优化技术在资源受限场景中平衡 AI 性能与实时性需求,然而在应对多源异构数据融合时,现有方法对数据质量差异的适应性不足,模型压缩过程中的精度损失补偿机制仍需完善,影响决策可靠性。

6) 典型场景应用涵盖电力行业发输变配用全环节以及工业自动化领域,基于多元领域的工程适用性,证实其经济性与可靠性优势,未来需要进一步突破物理机理与数据智能的深度融合、极端场景适应性增强、百万级资源协同调控等关键技术,为构建新型电力系统提供技术支撑。

在新型电力系统快速建设的背景下,新问题与

新挑战对控制技术提出了更高要求, 而人工智能、云计算、边缘计算、芯片等新一代信息技术的发展为解决这些问题提供了可能。在此历史机遇下, 必须认识到, 未来电网的控制架构更可能呈现分层异构、协同互补的特征, 例如在底层设备侧仍存在大量采用成熟可靠的传统控制方法, 而在云侧、边缘侧等具备足够算力的节点, 逐步引入智能控制等一些先进控制方法进行优化和决策。在历史需要与基础技术具备之际, 希望本文能为新型电力系统建设提供一些有益的参考。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 2024 年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. (2025-01-27)[2025-07-21]. <http://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabc3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- [2] 国家能源局. 国家能源局关于印发《2025 年能源工作指导意见》的通知 国能发规划〔2025〕16 号[EB/OL]. (2025-02-27)[2025-07-21]. <https://www.nea.gov.cn/20250227/b60fb4f51097434e8c5d7ee19b423651/c.html>.
- [3] WU Qinghua, BOSE A, SINGH C, et al. Control and stability of large-scale power system with highly distributed renewable energy generation: viewpoints from six aspects[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 8-14.
- [4] XU Jian, XIE Boyu, LIAO Siyang, et al. Online assessment of conservation voltage reduction effects with micro-perturbation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2224-2238.
- [5] LU Xuegang, GAO Daochun, MO Xi, et al. Technology architecture for source-grid-load-storage collaborative control[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). Lanzhou: IEEE, 2023: 619-623.
- [6] WANG Ding, GAO Ning, LIU Derong, et al. Recent progress in reinforcement learning and adaptive dynamic programming for advanced control applications[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(1): 18-36.
- [7] 徐全, 陆超, 刘映尚, 等. 基于泰勒级数和离散傅里叶变换的综合自适应相量算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 37-43. XU Quan, LU Chao, LIU Yingshang, et al. Comprehensive adaptive phasor algorithm based on Taylor series and discrete Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 37-43(in Chinese).
- [8] 徐全, 于力, 袁智勇, 等. 基于多级自校验和多重切换的自适应相量算法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 18-24, 36. XU Quan, YU Li, YUAN Zhiyong, et al. Adaptive phasor algorithm based on multi-self-calibration and multi-switching[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 18-24, 36(in Chinese).
- [9] 徐全, 雷金勇, 袁智勇. 基于同步量测的配网态势感知技术在新型电力系统中应用与展望[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 136-143. XU Quan, LEI Jinyong, YUAN Zhiyong. Application and prospect of distribution network situation awareness technology based on synchronous measurement in new power systems[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 136-143(in Chinese).
- [10] 徐全, 李鹏, 袁智勇, 等. 基于磁阻效应的超快速同步相量测量方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 11-17. XU Quan, LI Peng, YUAN Zhiyong, et al. Ultra-fast phasor estimator based on magnetoresistance effect[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 11-17(in Chinese).
- [11] 徐全, 袁智勇, 雷金勇, 等. 基于 5G 的高精度同步相量测量及测试方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(7): 76-80. XU Quan, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. High precision synchronous phasor measurement and test method based on 5 th generation mobile networks[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(7): 76-80(in Chinese).
- [12] 徐全, 张子昊, 卓叶林, 等. 面向新型电力系统的分布式资源智能控制技术及测试验证[J]. 广东电力, 2025, 38(7): 30-40. XU Quan, ZHANG Zihao, ZHUO Yelin, et al. Distributed resource intelligent control technology and testing validation for new power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(7): 30-40(in Chinese).
- [13] 卢强. 数字电力系统(DPS)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 1-4. LU Qiang. Digital power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 1-4(in Chinese).
- [14] 汪际峰, 吴小辰, 林火华, 等. 数字电网的概念、特征与架构[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 36-41, 89. WANG Jifeng, WU Xiaochen, LIN Huohua, et al. Concepts, features and architectures of digital grids[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 36-41, 89(in Chinese).
- [15] ZHANG Zhaoyun, LV Linjun. Application status and prospects of digital twin technology in distribution grid[J]. Energy Reports, 2022, 8: 14170-14182.
- [16] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5001-5016. LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5001-5016(in Chinese).
- [17] HAN Jinglin, FENG Xichun, ZHAO Hui, et al. Multi-granularity signal processing method for digital twin power grids via graph representation learning[J]. Traitement du Signal, 2024, 41(3): 1263-1270.
- [18] XIAO Lijun, HAN Dezhi, YANG Ce, et al. TS-DP: an efficient data processing algorithm for distribution digital twin grid for industry 5.0[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2024, 70(1): 1983-1994.
- [19] 贺兴, 陈昱昱, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究(一): 概念、挑战与研究框架[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 547-560. HE Xing, CHEN Minyu, TANG Yuezhong, et al. System theory study on situation awareness of energy internet of things based on digital twins and metaverse (I): concept, challenge, and framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 547-560(in Chinese).
- [20] KHEMAKHEM F, ELLOUZI H, LTIFI H, et al. Agent-based intelligent decision support systems: a systematic review[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2022, 14(1): 20-34.
- [21] 李咸善, 宋国栋, 刘颂凯, 等. 考虑风储调频协同优化控制的储能调频容量配置[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025: 1-14[2025-07-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250613.1814.007>. LI Xianshan, SONG Guodong, LIU Songkai, et al. Configuration of energy storage frequency regulation capacity considering wind-storage frequency regulation cooperative optimization control[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-14[2025-07-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250613.1814.007>(in Chinese).
- [22] 唐跃中, 邵志奇, 郭创新, 等. 数字化电网概念研究[J]. 中国电力, 2009, 42(4): 75-78. TANG Yuezhong, SHAO Zhiqi, GUO Chuangxin, et al. Conceptual

- study on digital power grid[J]. *Electric Power*, 2009, 42(4): 75-78(in Chinese).
- [23] LUO Yu, PU Lina, LIU C H. Computing power and battery charging management for solar energy powered edge computing[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(3): 1913-1927.
- [24] WANG Jie, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. A bidirectional virtual inertia control strategy for the interconnected converter of standalone AC/DC hybrid microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 745-754.
- [25] ZAFAR M H, BUKHARI S M S, HOURAN M A, et al. Step towards secure and reliable smart grids in Industry 5.0: a federated learning assisted hybrid deep learning model for electricity theft detection using smart meters[J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 3001-3019.
- [26] DAVOUDKHANI I F, ZISHAN F, MANSOURI S, et al. Allocation of renewable energy resources in distribution systems while considering the uncertainty of wind and solar resources via the multi-objective Salp Swarm algorithm[J]. *Energies*, 2023, 16(1): 474.
- [27] MA Yumei, ZHU Donghai, ZHANG Ziqin, et al. Modeling and transient stability analysis for type-3 wind turbines using singular perturbation and Lyapunov methods[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(8): 8075-8086.
- [28] TUMARI M Z M, AHMAD M A, SUID M H, et al. An improved marine predators algorithm-tuned fractional-order PID controller for automatic voltage regulator system[J]. *Fractal and Fractional*, 2023, 7(7): 561.
- [29] 刘灏, 王紫薇, 毕天姝. 基于改进容积卡尔曼滤波的含光伏配电网动态状态估计[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(9): 157-165.  
LIU Hao, WANG Ziwei, BI Tianshu. Dynamic state estimation for distribution network with photovoltaic based on improved cubature Kalman filter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(9): 157-165(in Chinese).
- [30] 刘军, 全哲辰, 朱世祥, 等. 考虑疲劳载荷的双馈风电机组自适应 LQG 一次调频控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(9): 175-186.  
LIU Jun, QUAN Zhechen, ZHU Shixiang, et al. Adaptive linear quadratic Gaussian primary frequency regulation control strategy for doubly-fed wind turbines considering fatigue loads[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(9): 175-186(in Chinese).
- [31] 张雨, 方天治, 刘昊, 等. 基于  $\mu$  综合理论与遗传算法的并网逆变器鲁棒控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(12): 4891-4903.  
ZHANG Yu, FANG Tianzhi, LIU Hao, et al. Robust control method of grid-connected inverter based on  $\mu$ -synthesis theory and genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(12): 4891-4903(in Chinese).
- [32] ZHAO Yanwei, LIANG Hongjing, ZONG Guangdeng, et al. Event-based distributed finite-horizon  $H_\infty$  consensus control for constrained nonlinear multiagent systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 5369-5380.
- [33] HILL D J, MAREELS I M Y. Stability theory for differential/algebraic systems with application to power systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1990, 37(11): 1416-1423.
- [34] 李啸骥, 陈登义, 刘松. 多输入多输出微分代数系统的多目标反馈非线性控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1465-1473.  
LI Xiacong, CHEN Dengyi, LIU Song. Nonlinear control with multi-objective feedback for the multiple input multiple output differential algebraic system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1465-1473(in Chinese).
- [35] NADEEM M, NUGROHO S A, TAHA A F. Dynamic state estimation of nonlinear differential algebraic equation models of power networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2539-2552.
- [36] LIN Hongjian, CHUNG H S H, SHEN Ruihua, et al. Enhancing stability of DC cascaded systems with CPLs using MPC combined with NI and accounting for parameter uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(5): 5225-5238.
- [37] 任萍, 朱景伟, 赵燕, 等. 基于双滑模控制器的开关磁阻电机调速策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(11): 4501-4512.  
REN Ping, ZHU Jingwei, ZHAO Yan, et al. Speed control strategy for switched reluctance motor based on dual sliding mode controller[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(11): 4501-4512(in Chinese).
- [38] 段广仁. 高阶系统方法: I. 全驱系统与参数化设计[J]. *自动化学报*, 2020, 46(7): 1333-1345.  
DUAN Guangren. High-order system approaches: I. Fully-actuated systems and parametric designs[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1333-1345(in Chinese).
- [39] 段广仁. 高阶系统方法: II. 能控性与全驱性[J]. *自动化学报*, 2020, 46(8): 1571-1581.  
DUAN Guangren. High-order system approaches: II. Controllability and full-actuation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(8): 1571-1581(in Chinese).
- [40] 段广仁. 高阶系统方法: III. 能观性与观测器设计[J]. *自动化学报*, 2020, 46(9): 1885-1895.  
DUAN Guangren. High-order system approaches: III. Observability and observer design[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(9): 1885-1895(in Chinese).
- [41] DUAN Guangren. Fully actuated system approach for control: an overview[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(12): 7285-7306.
- [42] WEI Yadong, ZHANG BO. A robust controller based on high-order fully actuated approach for DC-DC buck converter with constant power loads in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(7): 9090-9106.
- [43] YU Yi, LIU Guoping, HUANG Yi, et al. Distributed learning-based secondary control for islanded DC microgrids: a high-order fully actuated system approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(3): 2990-3000.
- [44] YU Yi, LIU Guoping, HUANG Yi, et al. Fully actuated system-based modeling and control of DC microgrids with inductive tie lines: a predictive strategy[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, 72(2): 1990-2000.
- [45] 李鹏, 余涛, 李立涅, 等. 电力人工智能的演变与展望——从专业智能走向通用智能[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(16): 1-17.  
LI Peng, YU Tao, LI Licheng, et al. Retrospect and prospect of artificial intelligence for electric power system—from domain intelligence to general intelligence[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(16): 1-17(in Chinese).
- [46] 毕聪博, 唐聿劼, 罗永红, 等. 电力系统优化控制中强化学习方法应用及挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(1): 1-21.  
BI Congbo, TANG Yujie, LUO Yonghong, et al. Review on critical problems in reinforcement learning methods applied in power system optimization and control scenarios[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(1): 1-21(in Chinese).
- [47] 李鹏, 黄文琦, 王鑫, 等. 数据与知识联合驱动的人工智能方法在电力调度中的应用综述[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(1): 160-175.  
LI Peng, HUANG Wenqi, WANG Xin, et al. Review on application of combined data-knowledge-driven artificial intelligence methods in power dispatching[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024,

- 48(1): 160-175(in Chinese).
- [48] 姚文龙, 裴春博, 池荣虎, 等. 基于无模型自适应控制的船舶微电网二次调频控制策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 135-146. YAO Wenlong, PEI Chunbo, CHI Ronghu, et al. Secondary frequency modulation control strategy of ship microgrid with model-free adaptive control[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(3): 135-146(in Chinese).
- [49] MAGED N A, HASANIEN H M, EBRAHIM E A, et al. Optimal real-time implementation of fuzzy logic control strategy for performance enhancement of autonomous microgrids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 151: 109140.
- [50] 萧文聪, 陈俊斌, 余涛, 等. 基于专家知识嵌入强化学习的配电系统灾后恢复决策方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(12): 91-100. XIAO Wencong, CHEN Junbin, YU Tao, et al. Decision-making method for post-disaster distribution system restoration based on expert knowledge-embedded reinforcement learning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(12): 91-100(in Chinese).
- [51] MOUNIR N, OUADI H, JRHILIFA I. Short-term electric load forecasting using an EMD-BI-LSTM approach for smart grid energy management system[J]. *Energy and Buildings*, 2023, 288: 113022.
- [52] THOMAS J B, CHAUDHARI S G, SHIHABUDHEEN K V, et al. CNN-based transformer model for fault detection in power system networks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 2504210.
- [53] MENG Qinglin, HUSSAIN S, LUO Fengzhang, et al. An online reinforcement learning-based energy management strategy for microgrids with centralized control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(1): 1501-1510.
- [54] 李鹏, 黄文琦, 梁凌宇, 等. 人机混合增强决策智能在新型电力系统调控中的应用与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6347-6366. LI Peng, HUANG Wenqi, LIANG Lingyu, et al. Application and prospect of hybrid human-machine decision intelligence in the dispatch and control of next-era power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(16): 6347-6366(in Chinese).
- [55] TODEREAAN L, CIOARA T, ANGHIEL I, et al. Demand response optimization for smart grid integrated buildings: review of technology enablers landscape and innovation challenges[J]. *Energy and Buildings*, 2025, 326: 115067.
- [56] BAI Hao, WANG Yuli. Digital power grid based on digital twin: definition, structure and key technologies[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(S16): 390-397.
- [57] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [58] 孙如茵, 雷肖, 秦亮, 等. 新型电力系统最小惯量需求评估进展[J/OL]. 高电压技术, 2025: 1-13[2025-07-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250192>. SUN Ruyin, LEI Xiao, QIN Liang, et al. Progress in evaluation of minimum inertia requirement for new power systems[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2025: 1-13[2025-07-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250192>(in Chinese).
- [59] LI Chang, YANG Yaqian, DRAGICEVIC T, et al. A new perspective for relating virtual inertia with wideband oscillation of voltage in low-inertia DC microgrid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(7): 7029-7039.
- [60] GAO Yuanhai, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Analytical probabilistic power flow and global sensitivity analysis of distribution systems based on Gaussian mixture model of input-output variables[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(3): 5283-5296.
- [61] 秦倩倩, 沈雅琦, 宫海峰, 等. 基于阻抗协同重构的多逆变器并网系统宽频振荡抑制策略[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025: 1-13[2025-07-21]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1999.TM.20250926.1054.002>. QIN Qianqian, SHEN Yaqi, GONG Haifeng, et al. Wide-frequency oscillation suppression in multi-inverter grid-connected systems via coordinated impedance reshaping[J/OL]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2025: 1-13[2025-07-21]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1999.20250926.TM.1054.002>(in Chinese).
- [62] SUN Qiongqiong. Enhancing power grid data analysis with fusion algorithms for efficient association rule mining in large-scale datasets[J]. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 2024, 19(3): 6232.
- [63] PENG Xiaosong, YANG L T, WANG Xiaokang, et al. A high-efficiency parallel mechanism for canonical polyadic decomposition on heterogeneous computing platform[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2025, 74(10): 3377-3389.
- [64] LI Biaoqi, XU Min, ZHOU Yuan, et al. Optimization of security identification in power grid data through advanced encryption standard algorithm[J]. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 2024, 13(2): 239-263.
- [65] 杨玉泽, 刘文霞, 李承泽, 等. 面向电力 SCADA 系统的 FDIA 检测方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8602-8621. YANG Yuze, LIU Wenxia, LI Chengze, et al. Review of FDIA detection methods for electric power SCADA system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8602-8621(in Chinese).
- [66] LI Chun, ZHANG Junbo. Dynamic state estimation of power systems based on extended Kalman particle filter[C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Power and Systems (ICIPS)*. Shenzhen: IEEE, 2023: 638-644.
- [67] MANDAL A K, DE S. Joint optimal PMU placement and data pruning for resource efficient smart grid monitoring[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(3): 5382-5392.
- [68] 郝蛟, 王冬, 邱剑, 等. 基于图神经网络与 Informer 融合的主动配电网状态估计[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(8): 12-19. HAO Jiao, WANG Dong, QIU Jian, et al. State estimation for active distribution network based on graph neural network and Informer fusion[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(8): 12-19(in Chinese).
- [69] 王玥, 于越, 郭嘉辉, 等. 基于改进 Crossformer 伪量测构建的主动配电网预测辅助状态估计方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(6): 2999-3009. WANG Yue, YU Yue, GUO Jiahui, et al. Forecasting-aided state estimation method of active distribution network based on improved Crossformer pseudo-measurements modeling[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(6): 2999-3009(in Chinese).
- [70] ASCARI L B, COSTA A S. A bad data resilient multisensor fusion framework for hybrid state estimation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 132-146.
- [71] ZHU Tiechao, SHAO Zhenguo, LIN Junjie, et al. Interval dynamic harmonic high-resolution state estimation for distribution networks based on multisource measurement data fusion[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(4): 6682-6697.
- [72] ZHANG Qiuyan, WAN Shaohua, WANG Bo, et al. Anomaly detection based on random matrix theory for industrial power systems[J]. *Journal of Systems Architecture*, 2019, 95: 67-74.
- [73] 徐俊俊, 曹冬磊, 王志伟, 等. 内嵌物理知识学习的主动配电网态势异常信号检测与溯源[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-13[2025-07-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee>.

- 242133.
- XU Junjun, CAO Donglei, WANG Zhiwei, et al. A framework of anomaly signal detection and abduction analysis in active distribution network situation based on embedded physics knowledge learning[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-13[2025-07-21]. [https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242133\(in Chinese\)](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242133(in Chinese)).
- [74] 黄子蒙, 余娟, 向明旭, 等. 基于改进动态时间弯曲的PMU频率异常检测及类型识别[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 104-112.
- HUANG Zimeng, YU Juan, XIANG Mingxu, et al. Frequency anomaly detection and type identification of PMU based on improved dynamic time warping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 104-112(in Chinese).
- [75] LI Shimiao, PANDEY A, HOOI B, et al. Dynamic graph-based anomaly detection in the electrical grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3408-3422.
- [76] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定控制系统技术规范: GB/T 40587—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [77] 常勇, 徐政, 王超. 基于 Matlab 的电力系统分析工具包 PSAT 及其有效性检验[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 102-105.
- CHANG Yong, XU Zheng, WANG Chao. Matlab-based power system analysis toolbox and its validity check[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 102-105(in Chinese).
- [78] 纪泰鹏, 赵伟, 李永达, 等. 基于能量函数法的含虚拟惯性控制直驱风电场内部暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 38-48.
- Ji Taipeng, ZHAO Wei, LI Yongda, et al. Transient synchronization stability analysis of PMSG-based wind farm with virtual inertial control based on an energy function method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 38-48(in Chinese).
- [79] SUN Peng, TENG Yun, ZHANG Mingli, et al. Risk assessment for hybrid AC/DC systems based on transient energy function[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(4): 1654-1663.
- [80] JIA Wenhao, DING Tao, SHAHIDEHPOUR M. Formulation and convexity of an approximate energy function for power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5961-5964.
- [81] 李佳旭, 吴俊勇, 李焱苏, 等. 电力系统频率安全评估与紧急控制研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1817-1833.
- LI Jiayu, WU Junyong, LI Lusu, et al. Review on frequency safety assessment and emergency control of power system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1817-1833(in Chinese).
- [82] 陈一熙, 朱继忠, 刘嘉媛, 等. 基于混合分布式深度强化学习的电力系统暂态稳定紧急控制[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1513-1523.
- CHEN Yixi, ZHU Jizhong, LIU Jiayuan, et al. Power system transient stability emergency control based on hybrid distributed deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1513-1523(in Chinese).
- [83] WU Xuhan, WANG Wentao, WANG Hong. Transient stability control system based on mapping cloud and online pre decision[C]//Proceedings of the IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE). Dalian: IEEE, 2021: 307-310.
- [84] XIONG Haoqing, HUANG Yanhao, DAI Fei, et al. Key technology and engineering application of pre decision system of quasi online dispatching control for massive power grid analysis: quasi online navigation system for power system operation[C]//Proceedings of the 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu: IEEE, 2021: 523-534.
- [85] 韩英铎, 陆超, 宋文超, 等. 电力系统在线安全稳定计算分析技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6733-6760.
- HAN Yingduo, LU Chao, SONG Wenchao, et al. Review and prospects of online calculation and analysis techniques for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6733-6760(in Chinese).
- [86] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 高比例新能源电力系统电压支撑强度实时量测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(5): 1741-1751.
- YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Research on the real-time measurement method of the strength of the power system with high penetration of renewable energies[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1741-1751(in Chinese).
- [87] 李东颖, 朱健全, 陈一熙. 基于双缓冲区生成对抗模仿学习的电力系统实时安全约束经济调度[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 1121-1129.
- LI Dongying, ZHU Jianquan, CHEN Yixi. Security-constrained economic dispatch of power systems based on dual buffer generative adversarial imitation learning[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 1121-1129(in Chinese).
- [88] 瞿凯平, 苏伟行, 姜宇轩, 等. 基于点估计仿射可鲁棒优化的含储能电力系统实时调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 207-218.
- QU Kaiping, SU Weihang, JIANG Yuxuan, et al. Real-time power dispatch with storages using point estimation-based affinely adjustable robust optimization[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 207-218(in Chinese).
- [89] 韩磊, 胥国毅, 王程, 等. 新能源电力系统调频资源与频率时空动态关联分析及分布表征[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(13): 5106-5118.
- HAN Lei, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Correlation analysis and distribution characterization of frequency regulation resources and frequency spatiotemporal dynamics in renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(13): 5106-5118(in Chinese).
- [90] 朱靖恺, 崔勇, 杜洋, 等. 采用改进量子粒子群优化算法的虚拟电厂参与二次调频两阶段优化[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 112-120.
- ZHU Jingkai, CUI Yong, DU Yang, et al. Two-stage optimization of virtual power plant participating in secondary frequency regulation using improved quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 112-120(in Chinese).
- [91] LONG Bo, LIAO Yong, CHONG K T, et al. Enhancement of frequency regulation in AC microgrid: a fuzzy-MPC controlled virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3138-3149.
- [92] WAN Xu, SUN Mingyang. AdapSafe2: prior-free safe-certified reinforcement learning for multi-area frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(3): 2244-2257.
- [93] LIANG Yanchang, ZHAO Xiaowei, SUN Li. A multiagent reinforcement learning approach for wind farm frequency control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2): 1725-1734.
- [94] XU Zhiqi, JIANG Wei, XU Junjun, et al. A power-grid-mapping edge computing structure for digital distributed distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(4): 3432-3445.

- [95] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能电网[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(6): 551-556.  
YU Yixin. A brief description of the basics of the smart grid[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(6): 551-556(in Chinese).
- [96] 吕小东, 高红均, 贺帅佳, 等. 计及混合通信组网的信息物理主动配电系统协调规划[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 4987-5000.  
LYU Xiaodong, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. Integrated planning of cyber-physical active distribution system considering hybrid communication networking[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 4987-5000(in Chinese).
- [97] WU Shutan, WANG Qi, CHEN Qichao, et al. Cyber-physical integrated planning of distribution networks considering spatial-temporal flexible resources[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 142-156.
- [98] 李鹏, 陈元峰, 周钱雨凡, 等. 电力市场环境信息物理社会融合的电力系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3354-3365.  
LI Peng, CHEN Yuanfeng, ZHOU Qianyufan, et al. Optimal dispatch of power system based on cyber-physical-social integration under the power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3354-3365(in Chinese).
- [99] LI Xin, XU Qimin, LU Xuanzhao, et al. Distributionally robust coordinated defense strategy for time-sensitive networking enabled cyber-physical power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(3): 3278-3287.
- [100] 董申, 周步祥, 臧天磊, 等. 考虑快速响应应急资源的配电信息物理系统灾后协同恢复方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-15[2025-07-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241688>.  
DONG Shen, ZHOU Buxiang, ZANG Tianlei, et al. Post-disaster coordinated restoration method for power distribution cyber-physical system considering rapid response emergency resource[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-15[2025-07-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241688>(in Chinese).
- [101] TAO Yuechuan, QIU Jing, LAI Shuying, et al. Distributed adaptive robust restoration scheme of cyber-physical active distribution system with voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2170-2184.
- [102] LINGHU Jiale, GAO Weifeng, DONG Hao, et al. Higher-order multi-scale physics-informed neural network (HOMS-PINN) method and its convergence analysis for solving elastic problems of authentic composite materials[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2025, 456: 116223.
- [103] LIU Wencheng, MAO Zhizhong, JIANG Lin. A cloud-edge collaborative framework for power load forecasting using deep learning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 2535812.
- [104] MO Lili, LAN Junkun, CHEN Zhizhong, et al. Multi-time scale frequency regulation control of virtual power plant based on fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(3): 2361-2374.
- [105] LIANG Yan, ZHOU Ming. A two-stage optimization configuration model for multi-type flexible resource considering spatiotemporal response characteristics[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1381396.
- [106] HAMIDI A, HAMZEH M, BOZORG M, et al. Performance-based capacity allocation of DERs to improve aggregated flexibility provision[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2025, 16(4): 2968-2990.
- [107] CAO Yu, CHEN Junru, WANG Jing, et al. Aggregation model of generation-load-storage flexibility resources based on objective weighting and agglomerative nesting algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 247: 111790.
- [108] 刘灏, 毕天姝, 徐全, 等. 配电网高精度同步相量测量技术方案与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 23-29.  
LIU Hao, BI Tianshu, XU Quan, et al. Scheme and prospect of high-precision synchrophasor measurement technology for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 23-29(in Chinese).
- [109] LIU Yanchen, PENG Minfang. Research on peak load shifting for hybrid energy system with wind power and energy storage based on situation awareness[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 82: 110472.
- [110] KUMARI R, NAICK B K, GHOSH D. Reliability assessment of distribution system using Petri net for enhancement of situational awareness[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 224: 109739.
- [111] GRABNER M, WANG Yi, WEN Qingsong, et al. A global modeling framework for load forecasting in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4927-4941.
- [112] ZHANG Zhiqin, ZHAO Jian, WANG Xiaoyu. AM-HNN based real-time voltage estimation method of distribution network using joint PMU and AMI data[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 233: 110520.
- [113] DE CARO F, COLLIN A J, GIANNUZZI G M, et al. Experimental assessment of Markov chain models for data-driven voltage forecasting[J]. Smart Grids and Sustainable Energy, 2024, 9(1): 13.
- [114] ZHAO Shice, ZHAO Hongshan. Intelligent power equipment for autonomous situational awareness and active operation and maintenance[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(6): 2081-2090.
- [115] 许泽凯, 刘翌, 和敬涵, 等. 新型配电网多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 105-116.  
XU Zekai, LIU Zhao, HE Jinghan, et al. Distributed resource aggregation and aggregate optimization operation method of multi-virtual power plant in new power distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 105-116(in Chinese).
- [116] WANG Rui, JI Haoran, LI Peng, et al. Multi-resource dynamic coordinated planning of flexible distribution network[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 4576.
- [117] YAO Zongjun, ZHANG Tieyan, HUANG Jinfeng. Zonotope approximation based flexible cluster division method for load-side resource scheduling[J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(16): 3593-3602.
- [118] LI Houjun, DOU Chunxia, YUE Dong, et al. Uncertainty aggregation characterization for multi spatial-temporal distributed energy resources: a cloud-edge-end collaboration framework[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2025, 21(10): 7510-7521.
- [119] 徐箭, 雷熙淳, 廖思阳, 等. 配电网多馈线负荷协同的直控型虚拟电厂自动功率控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 22-32.  
XU Jian, LEI Xichun, LIAO Siyang, et al. Automatic power control of direct-controlled virtual power plant based on multi-feeder load coordination in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 22-32(in Chinese).
- [120] 习伟, 李鹏, 李鹏, 等. 基于深度强化学习的分布式电源就地自适应电压控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 25-31.  
XI Wei, LI Peng, LI Peng, et al. Adaptive local voltage control method for distributed generator based on deep reinforcement

- learning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(22): 25-31(in Chinese).
- [121] 陆国超, 王中冠, 郭力, 等. 基于潮流元模型的有源配电网变拓扑自适应电压控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(8): 217-224.  
LU Guochao, WANG Zhongguan, GUO Li, et al. Voltage control method for active distribution networks based on topology adaptive power flow meta-model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(8): 217-224(in Chinese).
- [122] 杨浩, 王佳怡, 易文飞, 等. 知识-数据融合驱动的配电网光伏逆变器电压/无功优化自适应控制[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(22): 8691-8705.  
YANG Hao, WANG Jiayi, YI Wenfei, et al. Hybrid knowledge-data driven adaptive voltage/var optimization control of photovoltaic inverters in distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(22): 8691-8705(in Chinese).
- [123] ZHAO Yu, LIU Jun, LIU Xiaoming, et al. Distribution network expansion-friendly adaptive deep reinforcement learning for inverter-based volt-var control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(4): 3461-3464.
- [124] ZHANG Yuntian, ZHANG Tiance, LIU Siwei, et al. Perception method of voltage spatial-temporal distribution for EV enriched distribution network: a priority adaptive DNN enhancement approach[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2025, 61(2): 2386-2396.
- [125] 石磊磊, 贾清泉, 林丽娟, 等. 电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2914-2923.  
SHI Leilei, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Distributed global optimal harmonic mitigation strategy for power electronics high penetrated distribution networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2914-2923(in Chinese).
- [126] 林丽娟, 贾清泉, 田书娅, 等. 基于一致性算法的配电网谐波分布式治理策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(2): 109-117.  
LIN Lijuan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Distributed harmonic mitigation strategy of distribution network based on consensus algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(2): 109-117(in Chinese).
- [127] 陈娟, 李筱笛, 鲁斌. 合作联盟视角下点对点电力市场模式及行为演化[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3227-3237.  
CHEN Juan, LI Xiaodi, LU Bin. Point-to-point power market mode and behavior evolution from perspective of cooperative alliance[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3227-3237(in Chinese).
- [128] 帅轩越, 王秀丽, 原晟淇, 等. 电力市场环境下基于改进纳什议价方法的多微网能源交易机制设计[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(11): 97-105.  
SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, YUAN Shengqi, et al. Design of multi-microgrid energy trading mechanism based on improved Nash bargaining method in electricity market environment[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(11): 97-105(in Chinese).
- [129] 田海东, 何山, 艾纯玉, 等. 计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作博弈运行优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 29-41.  
TIAN Haidong, HE Shan, AI Chunyu, et al. Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nash bargaining model considering energy trading[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 29-41(in Chinese).
- [130] HOU Hui, WANG Zhuo, ZHAO Bo, et al. Distributed optimization for joint peer-to-peer electricity and carbon trading among multi-energy microgrids considering renewable generation uncertainty[J]. *Energy Conversion and Economics*, 2024, 5(2): 116-131.
- [131] ZHANG Yi, XIANG Mengru, ZHENG Zonghua. An IGDT-based decision model for industrial users participating in electricity and carbon markets considering differentiated power quality services[J]. *Energy*, 2025, 315: 134350.
- [132] KALOSPYROU I, HUTTY T, MILTON R, et al. Flexible aggressiveness probabilistic optimisation (FAPO) bidding for peer-to-peer electricity trading[J]. *Energy and AI*, 2025, 21: 100543.
- [133] PAN Dingwen, SHI Jian, BHATT P, et al. Carbon-aware microgrid scheduling with end-to-end learning[C]//*Proceedings of the 2025 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*. Manhattan: IEEE, 2025: 1-5.
- [134] OUYANG Jiahao, LI Gang, XU Xiaoyuan, et al. An end-to-end prediction method for energy storage system arbitrage with battery degradation costs[C]//*Proceedings of the IEEE 8th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. Shenyang: IEEE, 2024: 2293-2298.
- [135] YI Ming, ALGHUMAYJAN S, XU Bolun. Perturbed decision-focused learning for modeling strategic energy storage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(3): 2574-2586.
- [136] 朱晓荣, 杜雯菲. 基于能量管理的直流微电网集群协同控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(1): 123-130.  
ZHU Xiaorong, DU Wenfei. Coordinated control strategy of DC microgrid cluster based on energy management[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(1): 123-130(in Chinese).
- [137] YI Pingtao, WANG Shiye, LI Weiwei. Self-confidence and consensus-based group decision making methods and applications[J]. *Information Sciences*, 2024, 680: 121110.
- [138] STRANG M, MILLER M, HILL R, et al. Group decision performance: the predictive role of decision making styles and cognition[J]. *Personality and Individual Differences*, 2023, 206: 112114.
- [139] SHEN Bing, HU Yundong. Fault self balancing control method for medium and low voltage distribution equipment based on improved DQN algorithm[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Grid and Artificial Intelligence (SGAI)*. Changsha: IEEE, 2025: 1184-1187.
- [140] LI Haobin, TAN Huijuan, LIN Yueting, et al. Distributed generation planning for improving self-healing ability of distribution network[C]//*Proceedings of the 3rd International Conference on Energy and Electrical Power Systems (ICEEPS)*. Guangzhou: IEEE, 2024: 318-323.
- [141] WANG Shishi, LIN Xinke, CHEN Ziwei, et al. Research on distributed photovoltaic autonomous optimization control strategy under the guidance of voltage optimization principle[C]//*Proceedings of the IEEE 4th International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)*. Dalian: IEEE, 2024: 256-260.
- [142] 莫栋成, 程启明, 吴忠, 等. 电网不平衡下基于VSG控制的DFIG转子侧控制方法研究[J/OL]. *控制工程*, 2024: 1-11[2025-07-21]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240698>.  
MO Dongcheng, CHENG Qiming, WU Zhong, et al. Research on control method of DFIG rotor-side converter based on VSG under unbalanced grid voltage[J/OL]. *Control Engineering of China*, 2024: 1-11[2025-07-21]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240698>(in Chinese).
- [143] MA Ruiqi, HE Shuiyuan, XIE Chongshan, et al. DC-link voltage stability analysis for three-level boost + full-bridge LLC cascaded

- converter using impedance modeling[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2025, 53(4): 2000-2019.
- [144] 郑楠. 分布式能源系统源储荷耦合特性及主动调控运行策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
- [145] LI Xiangyu, LUO Fengji, LI Chaojie. Multi-agent deep reinforcement learning-based autonomous decision-making framework for community virtual power plants[J]. *Applied Energy*, 2024, 360: 122813.
- [146] 李逸超, 郭睿, 徐刚, 等. 用户侧电力需求响应控制系统设计[J]. *自动化仪表*, 2024, 45(4): 30-34, 39.  
LI Yichao, GUO Rui, XU Gang, et al. Design of user side power demand response control system[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2024, 45(4): 30-34, 39(in Chinese).
- [147] NIGAR N, SHAHZAD M K, FAISAL H M, et al. Improving demand-side energy management with energy advisor using machine learning[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2024, 2024(1): 6339681.
- [148] ZHU Sanmei. Construction of intelligent terminal equipment for electric internet of things based on edge computing model[J]. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 2023, 8(2): 2077-2084.
- [149] ALAVIKIA Z, SHABRO M. A comprehensive layered approach for implementing internet of things-enabled smart grid: a survey[J]. *Digital Communications and Networks*, 2022, 8(3): 388-410.
- [150] DONG Sichen. Application of power system wide-band oscillation monitoring and alarm system based on PMU data[C]//*Proceedings of the IEEE 2nd International Conference on Power Science and Technology (ICPST)*. Dali: IEEE, 2024: 1142-1146.
- [151] MA Guang, HUANG Juncong, ZHOU Nanjing, et al. Construction and application of SCADA system knowledge graph based on multi-source data fusion[C]//*Proceedings of the IEEE PES 16th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Nanjing: IEEE, 2024: 1-5.
- [152] POLAT O, AHMAD A A, OYUCU S, et al. Temporal-spatial feature extraction in IOT-based SCADA system security: hybrid CNN-LSTM and attention-based architectures for malware classification and attack detection[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 102109-102132.
- [153] CHENG Gang, LIN Yuzhang, ABUR A, et al. A survey of power system state estimation using multiple data sources: PMUs, SCADA, AMI, and beyond[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(1): 1129-1151.
- [154] PEI Jihong, HUANG Zhengliang, ZHU Jihong. Pruning rate-controlled filter order-information structure similarity graph clustering for DCNN structure optimization methods[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2024, 83(32): 78407-78431.
- [155] PARK S, KIM H, KIM H, et al. Pruning with scaled policy constraints for light-weight reinforcement learning[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 36055-36065.
- [156] XIAO Penghao, ZHANG Chunjie, GUO Qian, et al. Neural networks integer computation: quantizing convolutional neural networks of inference and training for object detection in embedded systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 15862-15884.
- [157] SEVILLA-ROMERO J U, PIZANO-MARTÍNEZ A, FUERTE-ESQUIVEL C R, et al. Two-stage transient-stability-constrained optimal power flow for preventive control of rotor angle stability and voltage sags[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2024, 12(5): 1357-1369.
- [158] LIU Yuang, CHEN Jun, LIU Yong. DCCD: reducing neural network redundancy via distillation[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, 35(7): 10006-10017.
- [159] ZHU Qidan, LI Jing, YUAN Fei, et al. Continuous sign language recognition based on cross-resolution knowledge distillation[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2025, 50(15): 11499-11511.
- [160] MA Aoqun, LI Zhi, SHEN Feifei, et al. Multi-objective dispatch of integrated renewable power systems leveraging robust optimization in deep reinforcement learning[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2025, 201: 109173.
- [161] ZHU Xingxu, ZHANG Yongsen, LI Junhui, et al. Shared energy storage assists the grid-connected two-layer online optimization control strategy of wind farm groups[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 99: 113237.
- [162] WU Long, YIN Xunyun, PAN Lei, et al. Smart energy management: process structure-based hybrid neural networks for optimal scheduling and economic predictive control in integrated systems[J]. *Applied Energy*, 2025, 380: 124965.
- [163] WU Silong, YU Yangchen, CHENG Yongquan, et al. Model construction of big data asset management system for digital power grid regulation[J]. *Information Technology and Control*, 2023, 52(4): 1087-1101.



徐全

在线出版日期: 2026-01-16。

收稿日期: 2025-09-17。

作者简介:

徐全(1989), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源控制技术、同步量测技术、配网态势感知控制, E-mail: whyxq@163.com;

马溪原(1986), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为新能源技术, E-mail: maxy@csg.cn。

(责任编辑 马晓华)