XXXX

面向新型电力系统的电–氢–储系统协同低碳运营体系构建与展望

崔 勇[1]，何文龙[2]，倪申鑫[2]
（[1]安徽科技工程大学经济与管理学院，安徽蚌埠 233030；[2]安徽科技工程大学电气与电子工程学院，安徽蚌埠 233030）

摘 要：高比例新能源并网下，电-氢-储多能耦合系统（electricity-hydrogen-storage multi-energy coupling system，EHS-MES）凭借氢能跨季节能量平移优势，成为支撑新型电力系统低碳转型的关键路径，但其协同运营受多源不确定性与多时间尺度协调的双重制约。本文从这两个维度系统梳理了EHS-MES协同运营的研究进展。总结了不确定性建模从随机规划、鲁棒优化向数据驱动与物理机理融合的演进脉络，重点分析了端到端隐式自适应决策规避显式预测误差传导、提升极端工况鲁棒性的潜力；归纳了多时间尺度调度从“日前-日内-实时”分层向跨尺度协同决策的转型，以及电-氢-储差异化时间尺度分工与嵌套协同机制；梳理了运行建模从系统抽象到设备精细再到系统-设备融合的递进规律及混合求解算法体系；分析了多目标优化从单一经济性向经济-安全-低碳三维协同的转变，以及电-碳-绿证多市场耦合与收益分配机制。指出设备精细模型与系统优化耦合困难、多时间尺度决策一致性不足、市场与运行缺乏动态反馈等核心挑战。展望了多物理场数字孪生、自适应协同决策、广域多能协同及多市场绿色价值量化四个方向。为面向新型电力系统的EHS-MES协同低碳运营体系构建与工程应用提供理论指导。

关键词：电-氢-储多能耦合系统；协同运营；多源不确定性；多时间尺度；多目标优化
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0407
中图分类号：TM 73　　文献标志码：A　　文章编号：2095-4239（XXXX）XX-1-15

Construction and prospects of collaborative low-carbon operation system of electricity-hydrogen-storage systems for new power system

CUI Yong[1], HE Wenlong[2], NI Shenxin[2]
([1]School of Economics and Management, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233030, Anhui, China; [2]School of Electrical and Electronic Engineering, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233030, Anhui, China)

Abstract: Under high penetration of renewable energy, the electricity-hydrogen-storage multi-energy coupling system (EHS-MES) has become a key pathway for the low-carbon transition of new power systems. Its main advantage lies in the cross-seasonal energy shifting capability of hydrogen. However, the collaborative operation of such systems is constrained by multi-source uncertainties and multi-time-scale coordination. This paper systematically reviews

收稿日期：2026-05-012；修改稿日期：2026-05-30。
基金项目：安徽省高校协同创新项目（GXXT-2023-065），国网新疆电力有限公司科技项目（SGTYHT/23-JS-001/SGXJJJOOKJJS2400015），浙江泰仑电力集团有限责任公司科技项目（SGTYHT/20-JS-223/CF058401002023001），安徽科技学院人才引进项目（GLYJ202202）。
第一作者及通信联系人：崔勇（1978—），男，副教授，硕士生导师，博士，主要研究方向为新能源电力系统规划设计、新能源电力系统调度优化、电力市场、系统优化决策、低碳经济发展规划，Email：cuiyong826@126.com。
引用本文：崔勇, 何文龙, 倪申鑫. 面向新型电力系统的电-氢-储系统协同低碳运营体系构建与展望[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-15.
Citation：CUI Yong, HE Wenlong, NI Shenxin. Construction and prospects of collaborative low-carbon operation system of electricity-hydrogen-storage systems for new power system[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-15.

recent progress from these two perspectives. Regarding uncertainty modeling, we trace the evolution from stochastic programming and robust optimization to the fusion of data-driven and physics-informed methods. Special attention is given to end-to-end implicit adaptive decision-making. This paradigm avoids explicit prediction error propagation and enhances robustness under extreme conditions. For multi-time-scale scheduling, we summarize the shift from the traditional "day-ahead–intraday–real-time" hierarchy to cross-scale collaborative decision-making. The differentiated time-scale roles and nested coordination mechanisms of electricity, hydrogen, and storage are also highlighted. We then outline the progression of operational modeling, which moves from system-level abstraction to device-level refinement and further to system-device integration. The corresponding hybrid solution algorithms are introduced. In terms of multi-objective optimization, we analyze the shift from purely economic goals to the three-dimensional coordination of economy, security, and low-carbon. The coupling mechanisms of electricity, carbon, and green certificate markets, along with benefit allocation schemes, are examined as well. Several core challenges are identified: the difficulty of coupling refined device models with system-level optimization, insufficient decision consistency across time scales, and a lack of dynamic feedback between market and operation. We point out four promising directions for future research: multi-physics digital twins, adaptive collaborative decision-making, wide-area multi-energy coordination, and quantitative valuation of green value in multi-market systems. This work provides theoretical guidance for both the conceptual design and real-world deployment of EHS-MES collaborative low-carbon operation systems in future power grids.

Keywords: electricity-hydrogen-storage multi-energy coupling system; collaborative operation; multi-source uncertainty; multiple time scales; multi-objective optimization

随着风电、光伏等可再生能源装机容量增长，其出力波动性和不确定性增强，传统储能配置难以平衡低碳、经济与可靠性，电力系统优化面临严峻挑战。EHS-MES凭借其电化学储能、氢能大规模存储和能量转化特点，实现跨季节能量时空转移，为系统优化提供新技术路径[1-4]。不同于以电化学储能或抽水蓄能为主的传统调节方式，氢能通过电-氢能量转换链路，在EHS-MES中实现短时间尺度电力波动与中长期能量平衡需求解耦。相较于电化学储能在容量和储能时长方面的限制，氢储能具备大规模、长周期及跨季节储能优势，其灵活部署特性使系统调节能力由电力系统内部拓展至多能系统层面，从而发挥关键纽带作用[5-7]。同时，关于EHS-MES研究逐渐从单一技术突破走向系统集成与协同优化。关键技术不断发展，高温固体氧化物电解槽技术、规模化绿氢生产技术、储氢技术逐步取得进展，在一定程度上缓解了氢能储运瓶颈[8-10]。系统建模方面，研究从机理建模向系统集成演进，推动建模向整体化与可扩展方向发展[11-12]。然而，在实际运行中仍面临挑战，包括可再生能源预测误差、多时间尺度调度协调、市场中电价、氢价、碳价多维耦合等问题[13-14]。应对上述问题关键是发展出统筹电-氢多能流耦合特性、多目标协同决策与多市场协同效益的系统化运营方法。因此，有必要对EHS-MES协同运营相关研究进行系统梳理与综合分析。首先，从多源不确定性及其对系统运行影响角度，概述现有研究主要建模思路与分析方法；其次，围绕多时间尺度协同运行问题，归纳不同调度框架在协调新能源波动与系统安全运行方面的研究进展；在此基础上，综合考虑系统运行建模与市场机制设计，总结不同研究路径在建模精度、计算复杂度与工程适用性方面共性特征与差异，并进一步提出当前研究中仍需关注的关键问题与未来发展方向，为在新型电力系统中构建科学高效规划方法

提供理论与方法参考。

1　EHS-MES协同运营总体框架

1.1　总体框架

现有研究围绕EHS-MES协同运营问题，从系统结构、运行特性及决策层级等多个层面展开了系统性探索。综合相关文献发现，协同运营并非围绕单一模型或方法展开，而是逐步形成了以多源不确定性和多时间尺度运行为核心的总体研究框架。在该框架中，氢能系统并非作为附属储能单元存在，而是通过制氢、储氢与用氢环节，将短时间尺度电力波动与中长期能量平衡需求进行解耦，增强EHS-MES在多时间尺度协同调度中缓冲和调节能力。首先，在高比例新能源接入背景下，风电、光伏及负荷波动构成系统运行主要不确定性来源，其刻画方式决定了系统对运行风险的认知基础，并对预测与调度决策可靠性产生重要影响；其次，基于不确定性认知形成的预测结果与风险描述，构成协同优化与运行决策关键信息基础，支撑系统在复杂运行环境下协调运行；再次，考虑电力系统与氢能系统在动态特性和运行周期上的差异，相关研究通过多时间尺度协同调度机制，实现不同层级决策之间协调与衔接；此外，随着市场化程度提升，多元市场机制逐步融入协同运营框架，其价格信号与激励方式对多主体运行行为产生引导作用。由此形成的总体框架体现了不确定性建模、预测与决策、多时间尺度调度以及市场与机制设计之间的内在联系，为研究提供了统一综述视角。总体框架如图1所示。

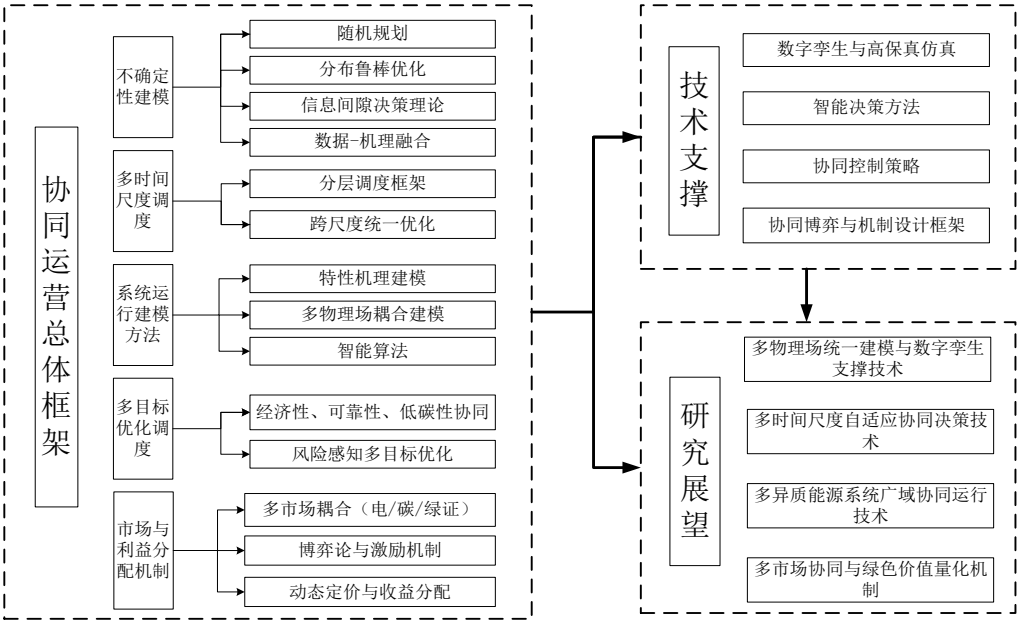


图1　总体框架

Fig. 1　Overall framework

1.2　可行性分析

基于上述总体框架构建，EHS-MES协同运营框架回应了高比例可再生能源接入下的系统运行挑战，其可行性建立在多领域技术逐步成熟基础上。当前，不确定性刻画领域已形成随机规划、分布鲁棒优化等完整方法体系，能够为系统应对风光波动与价格风险提供有效工具；运行优化层面，多时间尺度调度理论与多能流协同模型积累了丰富研究成果；市场机制方面，多市场耦合出清、合作博弈收益分配等方向探索也为协同激励设计提供了理论支撑。这些分散但深入的研究成果，构成了EHS-MES协同运营框架技术基础。尽管理论基础较为完备，但框架落地仍面临研究范式割裂瓶颈。设备多物理场精细模型与优化模型因计算复杂度差异难以有效耦合，导致理论策略与实际运行脱节；传统分层调度中各时间尺度目标相对独立，易引发决策偏差跨尺度传导；市场机制、运行调度与多主体行为之间缺乏动态反馈与联合设计，难以形成技术与

经济协同效应。这些割裂问题直接制约了框架整体效能与工程适用性。因此，框架实现关键不在于单点技术突破，而在于实现建模、优化与机制三个维度深度协同。总体而言，EHS-MES协同运营已具备扎实技术基础与清晰演进方向，在能源转型内在需求与技术融合趋势双重驱动下，其工程应用路径正日益明确。基于此，下文将系统梳理相关关键技术。

2 EHS-MES协同运营关键技术

基于上述可行性分析，为实现EHS-MES协同运营框架，需攻克多方面协同技术瓶颈。本节将系统综述其关键技术，围绕不确定性建模、多时间尺度协同调度、运行建模、多目标优化及市场机制等方面展开，以揭示协同运营实施技术路径。

2.1 EHS-MES的多重不确定性建模方法

2.1.1 不确定性建模方法的演进路径

EHS-MES运行面临风光出力与负荷波动内生不确定性，以及电力、碳、绿证多市场价格异动外生不确定性，且两类不确定性通过电−氢耦合链路形成跨时间尺度传导效应。这些因素成为影响协同运营的关键，忽略这些易造成容量配置失当与投资效益不达预期。为此，现有研究多采用多场景随机规划方法，通过蒙特卡洛模拟与场景缩减将随机问题转化为多场景确定性优化，实现不确定性量化纳入，适配有充足历史数据的中长期规划场景，但因强依赖精确概率分布，在极端风光出力、市场价格异动等小概率场景下决策易失效[15]；为突破这一局限，鲁棒优化与分布鲁棒优化成为当前工程应用主流，前者通过构建不确定集界定变量波动边界，无需概率分布即可保障最不利场景下策略可行，后者进一步引入概率模糊集，在保留鲁棒性同时显著降低传统方法的过度保守性，可有效应对多市场强不确定性扰动[16-17]；针对不确定性跨时间尺度传导特征，采用多时间尺度滚动优化方法，构建“多年度规划迭代-月度计划调整-日前预调度-日内滚动优化-实时反馈修正”全周期分层框架，中长期匹配氢储能长时调节特性与碳、绿证市场交易周期，短期适配电化学储能快响应特性与电力现货市场需求，通过滚动修正平抑预测误差，破解了长周期规划与短时调度脱节矛盾[18-19]；近年来，以深度强化学习为核心的数据驱动智能优化成为研究热点，无需预设不确定性分布，通过与环境持续交互实现动态自适应在线决策，高效处理高维、非线性多市场耦合问题，满足电力市场实时决策需求[20-21]，但仍存在训练数据依赖度高、极端工况下决策可解释性与安全保障性不足的局限。同时，针对深度不确定性问题，相关研究进一步通过构建不确定性集合或设置置信边界，对不确定因素的可能变化范围进行约束，并结合风险约束或鲁棒目标，将极端运行情形及其对系统安全性影响纳入优化过程，从而增强调度决策在复杂运行环境下稳健性[22]。优化方法对比如表1所示。

表1 优化方法对比

Table 1 Comparative Analysis of Optimization Methods

文献编号	优化方法	原理	核心优势	研究局限	适用场景
[15]	多场景随机规划	蒙特卡洛生成典型场景，将随机问题转化为多场景确定性优化	基础方法，首次实现不确定性量化纳入，适配常规场景	强依赖精准概率分布，极端工况下决策易失效	有足量历史数据的中长期规划、典型日调度
[16-17]	鲁棒/分布鲁棒优化	以不确定集/模糊集刻画波动边界，无需求解精准概率分布	摆脱概率分布依赖，平衡经济性与鲁棒性，为当前工程主流	传统鲁棒易过度保守，分布鲁棒建模难度高	市场价格、风光出力剧烈波动的强不确定性场景
[18-19]	多时间尺度滚动优化	构建日前-日内-实时分层框架，滚动修正调度策略	适配系统异质储能特性，实现不确定性全时间尺度覆盖	层级衔接逻辑复杂，关键参数适配难度大	长周期规划与短时调度协同的全周期优化场景
[20-21]	数据驱动智能优化	基于强化学习实现动态不确定性自适应学习与在线决策	无需预设分布，求解效率高，适配高维非线性场景	强依赖训练数据，极端工况可解释性与安全性不足	多市场耦合下的实时在线决策、动态自适应优化场景

整体而言，现有不确定性应对方法虽已形成覆盖不同场景的体系，但各类方法的缺陷无法通过自身迭代彻底解决，共同构成了经济性、鲁棒性与可实施性难以同时兼顾的矛盾。其本质在于，不确定性跨尺度耦合传导特性与单一方法的适用边界存在冲突，而当前研究多停留在不同方法简单组合应用

层面，尚未实现物理机理与数据驱动在建模逻辑上的深度融合。在实际工程应用中，往往需要根据经验在不同方法之间进行权衡，难以形成一套能够自适应不同风险等级与运行场景的统一决策框架，这也导致极端工况下决策可靠性始终无法得到有效保障。

2.1.2　数据驱动与物理机理融合的预测决策方法

EHS-MES源荷波动、多市场价格异动的多重不确定性具有非线性、强耦合、跨尺度特征，纯数据驱动或纯物理机理方法均难以同时满足不确定性刻画精度、鲁棒性与实时性要求，研究范式因此逐步演进为数据驱动与物理机理深度融合的预测决策一体化框架。早期纯数据驱动方法以深度学习为核心，通过挖掘新能源出力、负荷及市场价格时空关联特征提升常规场景预测精度，并与强化学习结合实现预测-决策初步联动，一定程度降低了不确定性对调度的影响；但该类方法依赖历史数据统计规律，在风光骤变、市场价格异动等极端不确定性场景下易因样本不足出现预测失真，有研究表明当新能源预测偏差达5%时，传统强化学习算法的新能源消纳率骤降至53.85%，且“黑箱”特性导致决策缺乏物理可解释性，难以保障极端工况运行安全[23-24]。联邦学习则通过多主体协同训练缓解了数据分散与隐私约束带来的预测不确定性，基于数据分解的个性化联邦学习方法在跨区域负荷预测中，较传统联邦平均方法的预测误差降低1.67%，但仍未解决物理一致性缺失问题，在强物理约束场景下可能出现违背能量守恒的预测结果[25]。为此，物理信息神经网络被引入，将能量守恒、设备动力学等机理转化为模型约束，强制预测结果符合物理边界。有研究在风电功率预测中，嵌入转子运动方程物理信息模型，较纯数据驱动模型的同工况预测误差下降50.8%，跨工况外推误差下降55.2%，显著提升了极端波动条件下不确定性刻画鲁棒性[26]。

上述方法虽然提升了不确定性刻画，但仍依赖显式的预测环节和不确定性参数假设，预测误差仍可能向决策跨环节传导，极端工况下鲁棒性难以保证。近期研究进一步跳出了“先建模不确定性、再优化决策”思路，提出端到端决策范式：直接从原始观测映射调度指令，将不确定性隐式内化于决策模型中，无需对风光出力、电价等不确定性进行显式概率建模。其中，可微优化嵌入训练使网络学习最优决策的隐式不确定性表征[27]；深度强化学习则通过环境交互完全省略预测环节，自适应习得应对随机波动的策略，无需对不确定性做显式分布假设，从根源规避预测误差传递，研究表明，基于时序深度强化学习的虚拟电厂调度，较传统序贯调度单日运行成本降低7.5%[28]。总体来看，EHS-MES不确定性建模正从显式预测与机理融合，进一步向端到端隐式自适应决策演进。该范式从原始观测直接映射调度指令，将不确定性内化于决策模型，规避了预测误差跨环节传导，摆脱了对先验概率分布的依赖。但如何将该范式隐式表征能力与电解槽安全边界、储氢压力动态等物理约束有机融合，仍是实现跨尺度鲁棒协同决策的核心挑战。

2.1.3　考虑不确定性的EHS-MES协同优化框架

在EHS-MES中，多源不确定性通过电-氢能量转换链路与多时间尺度决策耦合，其影响呈现跨环节、跨尺度传导特征，是协同优化框架需要解决的核心问题。新能源出力随机波动与电力市场价格波动相互叠加，会直接影响系统经济调度执行效果，导致运行成本与收益不确定性增大[29]。早期研究多聚焦于源侧风光出力不确定性，随着终端柔性电负荷调节能力提升和工业氢需求增长，负荷侧用电波动与终端氢需求不确定性被逐步纳入分析范畴，研究方向也从单侧不确定性分析，拓展为源-荷-储多主体协同建模[13,30]。随着电力、碳、绿证、氢能等多元市场体系逐步完善，电价、氢价、碳价与绿证价格形成了多维联动市场信号体系，其波动不确定性会进一步传导至决策层面，推动协同优化框架从单一电力市场价格响应模式，向多市场协同决策模式演进[31-32]。总体而言，EHS-MES协同优化框架正从局部环节不确定性建模，向系统级不确定性传导刻画方向深化，但目前对电-氢耦合系统中不确定性跨尺度耦合机理统一、定量描述仍有待进一步完善。

2.2　EHS-MES多时间尺度协同调度方法及其演进

针对上述多重不确定性跨时间尺度传导特性，多时间尺度协同调度成为EHS-MES实现高效协同运营的技术支撑，其本质是适配电-氢-储设备动态响应特性与运行周期差异，通过分层决策与协同衔接，破解长周期规划与短时调度脱节矛盾，提升系统在不确定性下的效能。在高比例新能源接入背景下，现有研究逐步形成了以“日前-日内-实时”为

核心的基础分层调度框架：日前层统筹制氢计划、储氢库存与设备启停，日内层滚动修正预测偏差并动态调整功率分配，实时层实现秒级平衡与快速响应[33-35]。然而，随着新能源渗透率持续提升，仅靠上述框架已难以应对日益突出的跨季节供需失衡问题。氢储能凭借大规模、跨季节能量平移能力和功率容量解耦特性，可将新能源大发季节的富余电力转化为氢能并跨季节存储，在低谷期释放，实现月季至年度能量再分配。相关研究进一步将氢储能细分为日调节与季节性两级，与电化学储能构成“电化学储能-日级氢储-季节氢储”三级协同框架，从小时到年度全尺度精细化匹配源荷不平衡，有效支撑高比例新能源系统在极端持续低出力场景下的长周期自治运行[36-37]。在该框架下，电-氢-储差异化运营得到进一步细化：电力系统与电化学储能承担毫秒至小时级快速功率调节，适配电力现货与辅助服务市场短时运营需求；氢能系统依托大容量长周期特性，负责日级至跨季节能量配置，支撑中长期碳、绿证市场运营目标[3]。通过这种“长期能量边界-短期功率调节”分层嵌套机制，长期尺度确定制氢强度区间、储氢库存策略与用氢边界，向下传递运营约束；短期尺度在边界内动态优化电-氢功率分配，兼顾了灵活性与经济性[38-40]。该机制在统一框架下通过对设备状态和能量库存的动态刻画，提升了跨尺度决策一致性，但高计算复杂度限制了其在大型系统在线运营中推广应用。因此，不同调度方法在计算与决策之间的权衡成为研究焦点，各类方法特征对比如表2所示。

表2 多时间尺度协同调度方法对比

Table 2 Comparison of multi-time scale collaborative scheduling methods

时间尺度	调度方法	核心特征	优势与局限	适用场景
长期/跨季节	能量配置规划	制氢强度、储氢容量、用氢边界设定	支撑跨季节平衡；不直接参与短时调节	跨区域能源规划、季节性储能
日前调度	传统分层调度	设备启停、制氢计划、库存管理	结构清晰易实施；易导致风险跨尺度传导	大规模系统日前计划
日内/滚动	滚动优化调度	预测偏差修正、功率再优化	适应不确定性；依赖预测精度	高比例新能源系统、微电网
实时控制	模型预测控制	秒级功率平衡、快速响应波动	响应快、保障安全；对实时性要求高	孤网运行、调频服务
跨尺度协同	统一优化框架	多尺度一体化建模、状态传递、决策一致	整体性能优；模型复杂、求解慢	中小系统仿真、离线规划
演进方向	自适应协同决策	内嵌风险感知、在线学习、多目标动态权衡	适应复杂工况；可解释性与验证待提升	智慧能源系统、数字孪生应用

总体来看，多时间尺度调度虽已实现从传统分层协调向跨尺度协同决策的范式转型，但层级间目标冲突与信息割裂问题依然存在，且当前框架对氢能跨季节调节价值挖掘仍不充分。现有方法在全局最优性与计算效率之间面临两难，追求精细刻画将导致计算复杂度指数增长，难以在线应用于大型能源系统；过度简化虽满足实时性，却以牺牲决策一致性和最优性为代价。如何将季节性氢储的多时间尺度库存约束与极端场景下的长周期自治需求嵌入统一框架，在计算与决策之间取得平衡，是下一步需要突破的问题。

2.3 EHS-MES运行建模方法的演进

EHS-MES协同优化需依托适配的运行建模与智能求解算法，其精度与效率决定了运营策略可行性与经济性。现有研究围绕不同运营目标与分析尺度，形成了分层递进建模方法体系，并衍生出匹配模型复杂度的智能求解算法。运行建模层面，早期以系统级抽象建模为主，通过等效效率曲线、运行边界约束刻画电-氢-热能量流动与库存演化，采用多目标或双层决策框架聚焦宏观运营规律，计算效率高，适用于区域级系统中长期规划与日前调度[41-42]，但因忽略设备微观特性，易导致理论策略与实际运行脱节。设备级精细建模则从关键能量转换设备出发，将电化学反应、传热传质及运行模式切换纳入多物理场或多状态模型，能更准确刻画电-氢耦合设备的运行约束与动态响应特征[43]，但高计算复杂度和参数依赖性限制了其在大尺度、长时间调度中直接应用。而在电-氢-储系统中，上述瓶颈因氢能设备特性而更为突出。碱性电解槽与质子交换膜电解槽在动态响应速度、启停约束及低负荷安全边界上差异显著，使得模型中须引入大量非线性约束与整数变量；高压储氢罐压力与充放氢速率呈非线性耦合，使得传统等效模型难以准确描述其动态过程；功率波动引发的寿命衰减尚缺乏精确量化模型。这些特性使优化问题呈现强非线性和非凸性，构成了区别于传统电-储系统的技术壁垒[44-45]。为突破这一瓶颈，研究转向探索系统-设备融合路径，通过模型降阶提取设备关键特征嵌入系统框

架，兼顾精度与效率。然而，传统降阶方法在强非线性、多物理场耦合场景下仍存在信息损失大、泛化能力不足等局限。近年来，以图神经网络、生成式对抗网络和神经算子为代表的深度学习技术，为突破传统模型降阶局限提供了新路径。文献[46]指出，图神经网络能天然捕捉多能系统拓扑信息，正逐步成为构建高效代理模型的核心选择；结合生成式对抗网络进行场景数据增强，或融入物理约束形成物理信息图神经网络，可大幅提升计算效率与可解释性。这为EHS-MES中电解槽、储氢罐等强非线性设备精细化降阶建模提供了新思路。

智能求解算法层面，随系统耦合程度加深，优化问题呈现高维非线性、多目标强约束特征，推动算法从传统数学优化向混合智能算法演进。早期线性规划、混合整数线性规划等传统数学优化算法精度高、可解释性强，但面对含多重不确定性的多时间尺度调度场景，求解效率骤降，无法满足实时需求；遗传算法、粒子群优化等智能算法可快速得到近似最优解，适配高维多目标场景，但易陷入局部最优；当前混合求解算法成为主流，结合数学优化的精确性与智能算法的高效性，同时引入自适应分解、动态权重调整提升多目标权衡能力，其中膝点驱动两阶段进化算法较传统BLEMO、OMOPSO-BL算法分别取得62%、68%的显著优势，比OMOPSO-BL减少109680次函数评估[47]，多形式进化搜索框架在标准测试集上较传统BLEMO计算效率提升3-4倍，仅用1/4-1/3的函数评估次数即可达到同等精度[48]；同时，针对多主体分布式运营场景，分布式交替方向乘子法等算法也得到应用，可在保护商业隐私前提下实现全局协同。

总体而言，运行建模与求解技术发展始终围绕精度与效率的平衡展开，但现有系统与设备融合路径仍存在明显局限。模型降阶技术虽能在一定程度上兼顾二者，但不可避免地会损失设备微观动态特性信息，且这种信息损失对系统级优化结果的影响难以量化评估，导致理论最优策略在实际运行中仍存在失效风险。同时，智能求解算法虽然在处理高维非线性问题上展现出优势，但其黑箱特性使得决策过程缺乏可解释性，在极端不确定性下的鲁棒性也无法得到严格证明，这也制约了其在工程中大规模应用。如何量化降阶模型信息损失对优化结果的影响，并提升求解算法可解释性与鲁棒性，是运行建模与求解方法进一步发展的关键。

2.4　EHS-MES多目标联合调度优化

随着EHS-MES规模扩大与耦合程度加深，其调度优化目标由单一经济性导向逐步演进为兼顾经济性、运行可靠性与低碳性的多目标协同决策问题。经济性目标为系统运行提供成本基准，可靠性约束用于防止在高比例新能源波动条件下出现极端运行状态，而碳排放目标则将环境外部性内生为调度约束或优化目标，通过多目标联合建模，相关研究致力于在不同性能指标之间形成可调节、可权衡的折中解[49]。在多重不确定性约束、多时间尺度协同调度逻辑与精细化运行建模的支撑下，多目标联合调度成为协同运营中形成可落地执行策略的核心环节，其目标统筹与权衡能力直接影响系统综合效益。

早期研究以单一经济性为主要导向，通过技术经济对比揭示了氢储能长周期能量平衡与电化学储能短时功率调节的互补优势，构建了以运行成本最小化、供能可靠性最大化为核心的双目标调度模型，实现了电-氢-储资源基础协同配置[50-51]。随着“双碳”目标约束强化与多元市场体系完善，碳排放约束、动态碳因子及阶梯式碳交易机制被系统纳入调度框架。为克服传统静态平均碳排放因子无法反映碳排放时空差异局限，碳计量正进一步向基于实时电网碳流与节点边际排放因子的动态碳计量演进，以实现碳排放责任时空精准追溯[52]。这一演进使得低碳调度信号更加精细化，进而推动多目标优化从“技术-经济权衡”向“经济-安全-低碳三维协同”深化，使调度策略能够同时适配电力市场的经济收益、碳与绿证市场的环境收益及系统安全运行要求[53-55]。然而，三个目标之间存在本质冲突：极致低碳要求优先消纳新能源制氢，易导致电解槽频繁启停与低负荷运行，既推高折旧成本，又突破设备安全边界；过度压缩投资会缩减储能与备用容量，削弱系统抗波动能力，加剧电压越限风险；片面追求安全冗余则会抬升运行成本，同时抑制新能源消纳与低碳效益释放。因此，现有研究主要通过NSGA-III算法生成完整帕累托前沿，结合组合赋权-改进灰靶决策选取最优折中解；并采用基于动态碳排放因子的分时段运行策略，高碳时段优先氢储能放电、低碳时段优先制氢充电，实现目标动态平衡[53]。同时，针对源荷波动与多市场价格异动带

来的多重不确定性对多目标权衡的扰动，研究进一步将多目标调度与随机规划、分布鲁棒优化等方法深度融合，通过引入条件风险价值等风险度量指标，在多目标框架中显式约束极端运行情形，避免单一目标最优导致运营风险失控，提升了调度策略在强波动场景下的稳健性[56-57]。同时，结合电-氢-储设备差异化的动态响应特性与多时间尺度需求，在不同时间层级设置差异化目标权重：长期尺度侧重低碳性与投资经济性，短期尺度侧重运行可靠性与实时经济性，初步实现了全时间尺度多目标动态协同。

总体来看，多目标调度体系虽已构建经济-安全-低碳协同框架，但氢储能多维价值的系统性量化与目标权重的动态自适应仍是短板。氢储能的调峰、备用与低碳价值在目标体系中分散考虑或部分缺失，难以形成全生命周期统一度量，导致优化结果偏向短期经济性而偏离综合最优。目标权重多依赖主观设定，缺乏与市场信号、运行状态和新能源出力特性的动态联动，使调度策略在实际工况变化时性能退化。如何将氢储能跨时间尺度多维价值统一纳入目标函数，并建立权重与系统状态的自适应映射，是实现全生命周期综合最优需突破的问题。

2.5 市场与利益分配机制

在EHS-MES协同运营中，技术层面的协同调度需与市场机制和利益分配规则相匹配，才能在多主体参与条件下实现长期稳定运行。随着电力现货市场、辅助服务市场以及氢能交易市场等逐步建立，EHS-MES运行决策由单一电价响应转向多市场价格信号共同驱动，其收益结构和协同行为呈现出明显的市场差异性和时间尺度分化特征[58-60]。

2.5.1 多市场耦合机制

电力、碳、绿证构成的多元市场体系，形成了“短期运行激励-中长期减排约束-环境价值补充”的差异化功能分工，三者通过价格信号传导与规则衔接形成功能互补、协同联动的闭环，共同构成系统协同运营的外部激励约束框架，破解了单一市场下经济性与低碳性难以兼顾矛盾。电力市场是调度运行核心载体，通过分时电价、现货价格及辅助服务补偿形成短期激励，引导系统利用时序价差实现新能源消纳与能量套利，同时驱动电池储能、可调电解槽等灵活性资源参与秒级至小时级的功率调节，获取削峰填谷与调频备用收益[61-63]。但动态定价机制在提升资源配置效率的同时，也使系统直接暴露于实时电价波动风险之下，需通过多市场联动进行对冲。碳市场以总量控制与配额交易为核心，通过碳价信号将碳排放成本内生化，抬升高碳电源边际成本，形成中长期减排约束，引导调度策略向新能源消纳与绿氢替代转型[64-65]，推动系统优先利用富余新能源制氢，从能源结构层面实现低碳目标。绿证市场通过分离新能源发电的电能属性与环境属性，显化其环境价值，提供独立于电能收益的额外收入来源，既对冲了电力市场价格波动风险，又与碳市场形成激励互补，进一步提升新能源消纳的经济性[66-67]。在此基础上，终端氢需求市场作为影响系统经济性的关键变量，正将市场耦合维度进一步拓展。氢价波动直接影响制氢收益与用氢成本，氢气储运成本在一定程度上决定了氢能供需匹配的空间范围，而绿氢溢价则为系统提供了独立于碳市场之外的环境价值回报。这些氢市场信号与电力、碳、绿证价格相互联动，推动市场耦合向氢能远期交易与跨国碳边境调节领域纵深拓展[68]。全球主要经济体通过长期合作协议提前锁定绿氢供应链，形成“源国产能布局-消费国供应锁定”的远期交易格局；绿氢溢价则受可再生能源电力成本主导，通过电价优惠、专项投资等政策干预逐步向市场驱动转型。同时，欧盟碳边境调节机制等跨国碳定价政策强化了绿氢的低碳竞争优势，推动全球绿氢碳计量标准与认证体系趋同，促使企业将绿氢生产布局于可再生资源富集地区以规避碳关税[69]。这些趋势为系统在多市场协同运营中纳入氢能远期交易信号与碳边境调节约束提供了新的前瞻性方向。上述多市场耦合机制的功能定位、时间尺度与核心作用各有不同，其整体特征对比如表3所示。

总体来看，电力、碳与绿证市场通过差异化时间尺度形成功能协同：电力市场以秒级至小时级价格信号驱动电化学储能与电解槽进行功率调节，获取电能套利与辅助服务收益；碳市场以月度至年度价格信号将碳排放成本内生化，引导富余新能源制氢；绿证市场以季度至年度价格信号显化环境价值，提供额外收入并与碳市场激励互补。三者共同构成EHS-MES跨时间尺度能量协同与多维度价值释放的复合收益结构。但当前市场间仍存在价格信号传导不畅、环境权益重复计算等问题，不同市场出清时序与结算规则的差异进一步增加了统一决策

表3　市场机制特征对比

Table 3　Comparison of market mechanism characteristics

文献编号	市场类型	功能定位	时间尺度	核心作用	现存问题
[61-63]	电力市场	短期运行激励	秒级至小时级	引导电池储能、可调电解槽参与功率调节，获取电能套利与辅助服务收益，支撑新能源消纳	系统直接暴露于实时电价波动风险
[64-65]	碳市场	中长期减排约束	月度至年度	将碳排放成本内生化，抬升高碳电源边际成本，引导优先利用富余新能源制氢	市场分割，价格信号传导不畅
[66-67]	绿证市场	环境价值补充	季度至年度	显化新能源环境价值，提供额外收入，对冲电力市场价格风险，与碳市场形成激励互补	存在环境权益重复计算，不同市场规则差异增加决策建模复杂度

建模的非线性与维度。如何打通跨市场价格耦合通道，统一环境权益计量与归属规则，建立时序协调的联合出清框架，是降低多市场协同决策复杂度的关键。

2.5.2　协同激励机制

市场化运行环境下，系统通常同时参与电力现货、调频辅助服务、碳排放权及绿证交易等多维市场，其多目标优化核心是整合不同市场的价格信号与规则约束，构建兼顾经济收益、低碳效益与运行安全的统一决策框架[60]。随着市场耦合程度不断加深，优化模型复杂度显著提升，准确刻画市场间相互作用、实现多目标协同优化成为该领域的关键。不同市场组合下目标函数与约束条件差异明显，单一电力市场以运行成本最小化为核心，仅考虑系统物理运行约束；双市场耦合新增碳交易成本项与碳配额履约约束；三市场及以上进一步纳入辅助服务、绿证交易收益及对应合规约束，市场耦合程度越高，目标体系越复杂，目标间冲突与协同关系也越显著[59]。同时，针对多市场耦合带来的非线性、非凸约束与市场间交互作用刻画难题，现有研究通过构建精细化市场耦合机制模型与鲁棒优化框架开展求解。文献[66]通过构建碳交易-绿证联合运行模型，证实绿证价格信号能够有效提升风光电源出力占比，降低系统碳排放水平；文献[70]则进一步将研究边界拓展至含氢综合能源系统，构建了计及碳-绿证协同交易机制优化模型，基于市场供需关系构建带奖惩特性的动态绿证与碳价曲线，通过非线性价格映射实现绿证-碳价动态联动，所建鲁棒优化模型可同步提升系统经济性与低碳性。总之，多元市场耦合可大幅提升EHS-MES综合效益，多市场耦合方案相较于仅参与单一电力市场方案，能够显著提升系统净收益、降低碳排放并提高新能源消纳率，充分验证了多市场耦合对提升系统综合性能的关键作用，为参与多元市场交易提供了坚实理论支撑。

2.5.3　收益分配机制

EHS-MES市场化运行体系包含电网运营商、储能运营商、制氢企业、可再生能源电站及终端用户等多元主体，各类主体具备独立利益诉求与决策目标，仅以个体收益最大化为导向的独立决策易降低资源配置效率，难以实现全局多目标最优。构建合理的多主体博弈模型与公平收益分配机制，是协调主体利益矛盾、保障系统高效协同运行的核心环节[71]。当前研究已形成适配不同市场结构的博弈理论体系，非合作博弈多用于完全竞争场景，主体以自身收益最优独立决策，通过纳什均衡刻画主体间交互关系[72]；主从博弈适用于运营商主导的层级化市场结构，采用双层优化框架实现价格规则制定与主体策略优化协同[73]；合作博弈面向多主体联盟场景，以整体收益最大化为目标，通过资源共享与风险共担提升系统综合效能[74]。

收益分配机制是维持合作联盟稳定的关键，遵循收益与贡献匹配原则，传统Shapley值仅考虑边际贡献，难以反映多目标协同价值，现有研究通过引入碳减排贡献、可靠性支撑、风险承担等多维因子进行改进，形成多目标加权收益分配模型，可更公平体现主体综合价值，增强联盟稳定性[75]。针对多主体交互带来的高维、动态、强耦合求解难题，多智能体强化学习、进化博弈等方法得到广泛应用，能够在不完全信息条件下模拟动态决策并快速收敛至均衡解，为复杂市场环境下协同决策提供有效技术支撑[76-77]。然而，上述方法多假设主体完全理性且偏好同质，依赖集中式信息处理，难以适应大规模中小主体（如分布式氢能站、电动车聚合商）分散决策的长尾需求，且存在数据隐私泄露隐患。为此，利益分配机制正逐步向兼顾中小主体长尾效应与分布式隐私保护的动态博弈方向演进，基于联邦学习的分布式训练框架可在保护本地数据的

前提下实现多主体协同决策与博弈均衡求解，成为该领域前沿探索方向[78-79]。

总体来看，现有收益分配研究已形成非合作博弈、主从博弈与合作博弈模型体系，Shapley值及其多维改进是主流分配准则，但多数方法基于静态市场假设与主体同质偏好，难以反映碳减排贡献、可靠性支撑等多维差异，对中小主体异质性特征与长尾需求考虑不足。集中式信息处理模式与大规模分布式主体接入之间存在矛盾，数据隐私泄露风险凸显。如何构建以联邦学习为代表的分布式协同决策框架，在保护本地数据隐私前提下实现多维度贡献量化与动态收益分配，是提升多主体协同运营公平性与长期稳定性的关键。

3 未来展望

上述内容分析了EHS-MES协同运营研究技术方面研究现状，下面将结合这些现状，围绕建模方法、决策机制、系统互联及市场设计等关键方向，对协同运营研究展望进行讨论。

3.1 多物理场统一建模与数字孪生支撑技术

针对运行建模中设备微观特性与系统宏观优化难以兼顾的矛盾，未来应以数字孪生技术为核心，构建多物理场统一建模体系。融合机理建模与数据驱动方法，精准刻画电解槽电化学反应动力学、储氢罐热-质传递及设备寿命衰减过程，通过模型降阶技术提取关键运行特征嵌入系统级框架，实现建模精度与计算效率协同提升。在此基础上，开发具备在线状态感知、模型自校正与运行策略预演功能的数字孪生平台，将数字孪生与调度优化、风险评估深度耦合，为EHS-MES在高比例新能源条件下安全、经济与低碳运行提供全流程仿真支撑。

3.2 多时间尺度自适应协同决策技术

为破解多时间尺度决策偏差传导与不确定性跨尺度放大难题，未来需构建内嵌风险感知与机理约束的自适应协同决策框架。突破传统分层调度目标割裂问题，建立“长期能量边界-中期计划调整-短期功率优化-实时反馈控制”一体化决策体系，通过状态传递、滚动约束与风险信息嵌入实现不同层级决策协同一致。引入具备在线学习与滚动更新能力的智能算法，动态刻画不确定性扰动与多目标权衡关系，同时，重点提升决策模型可解释性与鲁棒性，形成覆盖感知、决策、反馈、学习闭环调度体系，支撑大规模EHS-MES实时协同运营。

3.3 多异质能源系统广域协同运行技术

突破当前以单一系统或局部区域为对象的研究范式，未来需将EHS-MES纳入电-气-热-交通多能源网络深度耦合的广域协同框架。统一刻画多能流传输约束、异质能源动态响应特性及跨区域资源配置关系，构建支持分布式参与的协同运行机制，实现不同能源系统在运行自治基础上的信息共享与全局优化。推进多能系统标准化建模与协同控制技术融合，建立跨区域新能源消纳与能量互济体系，充分发挥EHS-MES在广域能源配置中的纽带作用，提升整体系统运行效率与可再生能源消纳能力。

3.4 多市场协同与绿色价值量化机制

针对当前市场耦合不足、环境权益重复计算及收益分配不合理问题，未来需构建多市场协同与绿色价值量化体系。突破电力、辅助服务、碳交易与绿证市场之间的机制壁垒，建立价格信号一致传导的协同出清机制，系统量化氢储能在调峰、备用及长期能量保障中的多维价值。完善覆盖绿电-绿氢全链条绿色认证与追溯体系，实现碳减排效益可量化、可交易与可追溯。设计基于多维度贡献的动态收益分配与风险共担机制，协调电网运营商、储能运营商、制氢企业等多元主体的利益关系，构建兼顾技术可行性、经济激励性与低碳导向性EHS-MES协同运营生态。

4 结语

围绕高比例新能源接入背景下EHS-MES协同运营问题，本文梳理了不确定性建模方法、多时间尺度协同调度、系统运行建模以及多市场与多主体协同机制等研究进展，并构建了协同运营机制分析框架，从系统层面揭示了该领域正由单一技术突破向着系统协同与综合决策方向演进。在此基础上，进一步凝练并剖析了当前研究在不确定性风险耦合刻画、多时间尺度协调机制统一性等方面的核心挑战，为推动该领域从局部优化迈向系统集成指明关键瓶颈与范式转型路径。结合上述认识，随后从系统协同角度，对多物理场统一建模与数字孪生支撑技术、多时间尺度自适应协同决策技术、多异质能源系统广域协同运行技术以及多市场协同与绿色价值量化机制等研究方向进行展望。总体来看，EHS-MES协同运营研究正逐步从方法探索走向体

系构建，未来还需在技术、机制与市场层面协同发力，以充分发挥氢储能在灵活调节、长期能量平衡与低碳转型中的系统价值，为新型电力系统安全、经济与低碳运行提供坚实支撑。

参 考 文 献

[1] 李建林,孙浩元,梁忠豪,等.多能需求场景下的综合能源系统容量优化配置[J].高电压技术,2025,51(05):2114-2124.
LI J L, SUN H Y, LIANG Z H, et al. Capacity optimization of integrated energy systems under multi-energy demand scenarios [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2114-2124.

[2] 李子晨,夏杨红,孙勇,等.考虑氢能长短周期储能特性的电氢综合能源系统容量配置方法[J].电网技术,2025,49(01):12-21.
LI Z C, XIA Y H, SUN Y, et al. Capacity configuration method of electricity-hydrogen integrated energy systems considering short- and long-term hydrogen energy storage characteristics[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 12-21.

[3] Gabrielli P, Poluzzi A, Kramer G J, et al. Seasonal energy storage for zero-emissions multi-energy systems via underground hydrogen storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 121: 109629.

[4] 赫亚庆,王维庆,王浩成,等.基于电热气多能耦合的SOC绿电制储运氢系统优化研究[J].储能科学与技术,2025,14(10):3824-3838.
HE Y Q, WANG W Q, WANG H C, et al. Optimization research on SOC green hydrogen production, storage and transportation system based on electric-thermal-gas multi-energy coupling[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3824-3838.

[5] Yue M, Lambert H, Pahon E, et al. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111180.

[6] Chen X, Pang Z, Zhang M, et al. Techno-economic study of a 100-MW-class multi-energy vehicle charging/refueling station: Using 100% renewable, liquid hydrogen, and superconductor technologies[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 276: 116463.

[7] Rabiee A, Keane A, Soroudi A. Green hydrogen: A new flexibility source for security constrained scheduling of power systems with renewable energies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(37): 19270-19284.

[8] Fallah Vostakola M, Ozcan H, El-Emam R S, et al. Recent advances in high-temperature steam electrolysis with solid oxide electrolysers for green hydrogen production[J]. Energies, 2023, 16(8): 3327.

[9] Hong Z, Wei Z, Han X. Optimization scheduling control strategy of wind-hydrogen system considering hydrogen production efficiency[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 47: 103609.

[10] Vives A M V, Wang R, Roy S, et al. Techno-economic analysis of large-scale green hydrogen production and storage[J]. Applied Energy, 2023, 346: 121333.

[11] Chen Z, Yiliang X, Hongxia Z, et al. Optimal design and performance assessment for a solar powered electricity, heating and hydrogen integrated energy system[J]. Energy, 2023, 262: 125453.

[12] Jiang S, Wen S, Zhu M, et al. Scenario-transformation-based optimal sizing of hybrid hydrogen-battery storage for multi-timescale islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1784-1795.

[13] 尚文强,李广磊,丁月明,等.考虑源荷不确定性和新能源消纳的综合能源系统协同调度方法[J].电网技术,2024,48(02):517-532.
SHANG W Q, LI G L, DING Y M, et al. Coordinated dispatch method of integrated energy systems considering source-load uncertainty and renewable energy accommodation[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 517-532.

[14] 王佳,杨萌,颜玉林,等.电-氢互补协同系统多维商业运营模式与发展策略[J].南方能源建设,2025,12(05):130-142.
WANG J, YANG M, YAN Y L, et al. Multidimensional business operation models and development strategies of electricity-hydrogen complementary coordinated systems[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(5): 130-142.

[15] 李晖,刘栋,秦继朔,等.考虑风光出力不确定性的新能源基地直流外送随机规划方法研究[J].电网技术,2024,48(07):2795-2803.
LI H, LIU D, QIN J S, et al. Stochastic programming method for DC transmission of renewable energy bases considering wind and solar output uncertainty[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2795-2803.

[16] Zhou Y, Li X, Han H, et al. Resilience-oriented planning of integrated electricity and heat systems: A stochastic distributionally robust optimization approach[J]. Applied Energy, 2024, 353: 122053.

[17] 钱帅帅,苏珈,杜欣慧,等.计及源-荷不确定性的综合能源系统分布鲁棒优化[J/OL].南方电网技术,1-13[2026-05-29].https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20251202.1752.024.
QIAN S S, SU J, DU X H, et al. Distributionally robust optimization of integrated energy systems considering source-load uncertainty[J/OL]. Southern Power System Technology, 2025: 1-13.

[18] 杨茂,王宇鑫,苏欣,等.计及电氢联产的综合能源系统日内双层优化调度[J].太阳能学报,2025,46(09):661-668.
YANG M, WANG Y X, SU X, et al. Day-ahead two-layer optimal dispatch of integrated energy system considering electricity-hydrogen co-production[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46 (09): 661-668.

[19] 阮宏华,邓子琦,陈飞雄,等.风水储联合运行双层滚动优化调度方法[J].中国电力,2026,59(04):1-11.
RUAN H H, DENG Z Q, CHEN F X, et al. Two-Layer Rolling Optimal Scheduling Method for Joint Operation of Wind-Hydro-Storage System[J]. Electric Power, 2026, 59(4): 1-11.

[20] Kang D, Kang D, Hwangbo S, et al. Optimal planning of hybrid energy storage systems using curtailed renewable energy through deep reinforcement learning[J]. Energy, 2023, 284: 128623.

[21] 彭春华,钟沂辰,孙惠娟,等.基于多智能体最优折中强化学习的多主体含氢综合能源系统优化调度[J].电网技术,2026,50(01):71-80.
PENG C H, ZHONG Y C, SUN H J, et al. Optimal Dispatch of Multi-Agent Hydrogen Integrated Energy System Based on Multi-Agent Optimal Compromise Reinforcement Learning[J]. Power System Technology, 2026, 50(1): 71-80.

[22] 王晓村,李腾飞,徐妍珺,等.基于信息间隙决策理论的电-气综合能源系统低碳经济调度[J].电测与仪表,2025,62(09):17-25.
WANG X C, LI T F, XU Y J, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas integrated energy systems based on information gap decision theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 17-25.

[23] 杨楠,宋旭日,董亮,等.基于生成式多对抗强化学习的高比例新能源电网日内优化调度[J].电力自动化设备,2025,45(11):43-51.
YANG N, SONG X R, DONG L, et al. Intraday optimal dispatch of power grids with high penetration of renewable energy based on generative multi-adversarial reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 43-51.

[24] 王凌云,胡景伦,陈鹤林,等.数据驱动下考虑风光季节特征的配电网电氢储能优化配置[J/OL].南方电网技术,1-16[2026-05-29].https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20260414.1018.004.
WANG L Y, HU J L, CHEN H L, et al. Data-driven optimal configuration of electricity-hydrogen energy storage in distribution networks considering seasonal characteristics of wind and solar power [J/OL]. Southern Power System Technology, 1-16 [2026-05-11].

[25] 焦润海,褚佳杰,李俊良,等.基于数据分解的多区域个性化联邦负荷预测方法[J].中国电机工程学报,2025,45(05):1691-1704.
JIAO R H, CHU J J, LI J L, et al. Multi-region personalized federated load forecasting method based on data decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1691-1704.

[26] 张维通,闫正兵,张正江,等.基于物理信息的时间卷积神经网络风电功率预测[J].计算机测量与控制,2024,32(11):101-108+117.
ZHANG W T, YAN Z B, ZHANG Z J, et al. Wind power prediction based on physics-informed temporal convolutional neural networks[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(11): 101-108, 117.

[27] Wahdany D, Schmitt C, Cremer J L. More than accuracy: end-to-end wind power forecasting that optimises the energy system[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 221: 109384.

[28] 孙国强,王希文,周亦洲,等.基于时序深度强化学习的虚拟电厂预测-决策一体化调度[J].电力自动化设备,2026,46(5):164-171.
SUN G Q, WANG X W, ZHOU Y Z, et al. Integrated prediction-decision scheduling of virtual power plants based on temporal deep reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(5): 164-171.

[29] 闫振靖,李皓然,杨欣可,等.基于不确定性分析与电价波动的电-氢-热综合能源系统分析[J].高压电器,2024,60(07):69-77.
YAN Z J, LI H R, YANG X K, et al. Analysis of electricity-hydrogen-heat integrated energy systems considering uncertainty and electricity price fluctuation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 69-77.

[30] 陈湘元,吴公平,龙卓,等.考虑源荷不确定性及用户侧需求响应的综合能源系统多时间尺度优化调度[J].电力科学与技术学报,2024,39(03):217-227.
CHEN X Y, WU G P, LONG Z, et al. Multi-timescale optimal dispatch of integrated energy systems considering source-load uncertainty and demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 217-227.

[31] 林女贵,徐鸣,郑美春,等.基于双碳目标的新能源电网电力交易优化方法[J].电测与仪表,2025,62(09):149-156.
LIN N G, XU M, ZHENG M C, et al. Optimization of electricity trading methods for renewable energy power grids under dual-carbon targets[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 149-156.

[32] 邹宇航,曾艾东,郝思鹏,等.阶梯式碳交易机制下综合能源系统多时间尺度优化调度[J].电网技术,2023,47(06):2185-2198.
ZOU Y H, ZENG A D, HAO S P, et al. Multi-timescale optimal dispatch of integrated energy systems under tiered carbon trading mechanisms[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2185-2198.

[33] 姜智霖,郝峰杰,袁志昌,等.考虑SOC优化设定的电-氢混合储能系统的运行优化[J].电力系统保护与控制,2024,52(08):65-76.
JIANG Z L, HAO F J, YUAN Z C, et al. Operational optimization of electricity-hydrogen hybrid energy storage systems considering SOC optimization settings[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 65-76.

[34] 程志平,穆玉皓,李忠文,等.综合能源系统全生命周期零碳规划及多时间尺度能量优化[J].电力系统保护与控制,2026,54(02):162-173.
CHENG Z P, MU Y H, LI Z W, et al. Life-cycle zero-carbon planning and multi-timescale energy optimization of integrated energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(2): 162-173.

[35] 余晋宇,周荔丹,于天佑,等.基于分布式模型预测控制的电-氢混合储能系统控制策略[J].电力系统自动化,2025,49(03):114-124.
YU J Y, ZHOU L D, YU T Y, et al. Control strategy of electricity-hydrogen hybrid energy storage systems based on distributed model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 114-124.

[36] 徐波,伍声宇,侯东羊,等.考虑季节性储氢的区域能源系统优化模型[J].智慧电力,2024,52(2):40-47.
XU B, WU S Y, HOU D Y, et al. Optimization model of regional energy system considering seasonal hydrogen storage[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 40-47.

[37] 丁琦欣,赵波,陈哲,等.基于多时间尺度特征提取的微网电氢混合储能协同优化配置[J].中国电机工程学报,2025,45(22):8867-8879.
DING Q X, ZHAO B, CHEN Z, et al. Collaborative optimal configuration of microgrid electricity-hydrogen hybrid energy storage based on multi-time scale feature extraction[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(22): 8867-8879.

[38] 许传博,张文座,刘继远,等.面向新型电力系统的电氢耦合多时空尺度规划:China-MSTPEHC综合规划模型[J/OL].中国电机工程学报,1-19[2026-04-21].https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20260115.1724.004.

XU C B, ZHANG W Z, LIU J Y, et al. Multi-spatiotemporal-scale planning of electricity-hydrogen coupling for new power systems: China-MSTPEHC integrated planning model[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2026: 1-19.

[39] 李东东,程诺,谭津,等.考虑长时储能的电-氢-热综合能源系统低碳规划方法[J/OL].现代电力,1-13[2026-04-21].https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.20260111.001.
LI D D, CHENG N, TAN J, et al. Low-carbon planning method for electricity-hydrogen-heat integrated energy systems considering long-duration energy storage[J/OL]. Modern Electric Power, 2026: 1-13.

[40] 金昱烨,方家琨,艾小猛,等.含季节性氢储能的电力系统跨尺度全年时序生产模拟方法[J].电力系统自动化,2025,49(14):120-129.
JIN Y Y, FANG J K, AI X M, et al. Cross-scale annual sequential production simulation of power systems with seasonal hydrogen energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(14): 120-129.

[41] Ji C, Zhou J, Song X, et al. Dynamic modeling and optimal control of switching modes in reversible solid oxide cells for integrated electric-hydrogen energy system[J]. Applied Energy, 2025, 397: 126270.

[42] Li R, Zhou J, Qiu Z, et al. Optimal model-based electrochemical characteristics and thermal management of reversible solid oxide cells[J]. Applied Energy, 2025, 395: 126204.

[43] 袁铁江,谭捷,闫华光.基于多物理场建模的质子交换膜电解槽暂态机理研究[J].中国电机工程学报,2026,46(05):1980-2002.
YUAN T J, TAN J, YAN H G. Transient mechanism study of proton exchange membrane electrolyzer based on multi-physics field modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(5): 1980-2002.

[44] 范新桥,张宽,赵波,等.面向PEM电解制氢的虚拟同步控制技术研究[J].储能科学与技术,2024,13(11):3949-3960.
FAN X Q, ZHANG K, ZHAO B, et al. Research on virtual synchronous control technology for PEM electrolytic hydrogen production[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13 (11): 3949-3960.

[45] 李志伟,赵雨泽,吴培,等.基于制氢设备精细建模的综合能源系统绿氢蓝氢协调低碳优化策略[J].电网技术,2024,48(6):2317-2326.
LI Z W, ZHAO Y Z, WU P, et al. Low-carbon optimal strategy of green hydrogen and blue hydrogen coordination for integrated energy system based on refined modeling of hydrogen production equipment[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2317-2326.

[46] 高昆仑,姚铁锤,刘思言,等.面向电网分析计算的图神经网络技术综述[J].电网技术,2026,50(3):909-921.

[47] Chen J, Ding J, Li K, et al. A knee point driven evolutionary algorithm for multiobjective bilevel optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2024, 54(7): 4177-4189.

[48] Feng Y, Feng L, Kwong S, et al. A multi-form evolutionary search paradigm for bi-level multi-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2023.

[49] Su Y, Lin Q, Ming Z, et al. Adapting decomposed directions for evolutionary multiobjective optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 53(10): 6289-6302.

[50] Le T S, Nguyen T N, Bui D K, et al. Optimal sizing of renewable energy storage: A techno-economic analysis of hydrogen, battery and hybrid systems considering degradation and seasonal storage[J]. Applied Energy, 2023, 336: 120817.

[51] 孙靓雨,林泽源,李伟.考虑氢储能的多目标综合能源优化配置方案研究[J].高压电器,2024,60(07):88-96.
SUN L Y, LIN Z Y, LI W. Multi-objective optimal configuration of integrated energy systems considering hydrogen energy storage [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 88-96.

[52] 何武,苗世洪,艾小猛,等.考虑边际碳排放因子的配电网日前日内优化调度策略[J].电力建设,2026,47(5):107-123.
HE W, MIAO S H, AI X M, et al. Day-ahead and intra-day optimal scheduling strategy for distribution network considering marginal carbon emission factor[J]. Electric Power Construction, 2026, 47 (5): 107-123.

[53] 赵晶晶,樊濠诚,王涵,等.考虑碳减排的配电网电-氢混合储能系统优化配置[J].电力自动化设备,2025,45(11):153-160.
ZHAO J J, FAN H C, WANG H, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage systems in distribution networks considering carbon emission reduction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 153-160.

[54] 赵北涛,刘光宇,韩东升.考虑氢能耦合及阶梯碳交易的综合能源系统多时间尺度低碳优化调度[J].电力科学与技术学报,2023,38(03):35-46.
ZHAO B T, LIU G Y, HAN D S. Multi-timescale low-carbon optimal dispatch of integrated energy systems considering hydrogen coupling and tiered carbon trading[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 35-46.

[55] 穆勇,路峰,刘大鹏,等.含风电制氢及多储能的综合能源系统灵活调度与碳排放分析[J].可再生能源,2025,43(11):1517-1526.
MU Y, LU F, LIU D P, et al. Flexible dispatch and carbon emission analysis of integrated energy systems with wind power hydrogen production and multiple energy storage technologies[J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(11): 1517-1526.

[56] 吴孟雪,房方.计及风光不确定性的电-热-氢综合能源系统分布鲁棒优化[J].电工技术学报,2023,38(13):3473-3485.
WU M X, FANG F. Distributionally robust optimization of electricity-heat-hydrogen integrated energy systems considering wind and solar uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3473-3485.

[57] 安娜,刘庭响,杨立滨,等.计及不确定性的含多类型储能的综合能源系统低碳经济调度[J].可再生能源,2025,43(09):1268-1278.
AN N, LIU T X, YANG L B, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy systems with multiple energy storage types considering uncertainty[J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(9): 1268-1278.

[58] 万靖,别芳玫,陈泽宇,等.现货市场下考虑等效循环寿命和温控负荷的综合能源需求响应运行策略[J].高压电器,2025,61(11):84-97.
WAN J, BIE F M, CHEN Z Y, et al. Demand response operation strategy of integrated energy systems considering equivalent

cycle life and temperature-controlled loads under spot markets[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 84-97.

[59] Yuan J, Zhang W, Shen Q, et al. The impact of electricity-carbon market coupling on system marginal clearing price and power supply cost[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(35): 84725-84741.

[60] 赵琛,彭思远,和萍,等.电-碳-绿证交易耦合下多虚拟电厂动态定价模型与博弈分析[J].电力系统自动化,2026,50(01):188-198.
ZHAO C, PENG S Y, HE P, et al. Dynamic pricing model and game analysis of multiple virtual power plants under the coupling of electricity-carbon-green certificate trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50 (01): 188-198.

[61] 赵晋泉,唐成魁,陈涛,等.基于顺序出清的惯量和一次调频辅助服务市场机制[J].电力系统自动化,2026,50(9):80-91.
ZHAO J Q, TANG C K, CHEN T, et al. Market mechanism of inertia and primary frequency regulation auxiliary services based on sequential clearing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(9): 80-91.

[62] 高赐威,严兴煜.支撑分布式新能源入市的需求侧资源参与系统运行和市场交易关键技术[J].供用电,2025,42(11):2+1.
GAO C W, YAN X Y. Key technologies for demand-side resources participating in system operation and market transactions to support distributed renewable energy market participation[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(11): 2+1.

[63] 孙浩,邢作霞,吴维宁,等.计及电力市场交易机制的风-光-储-氢混合电厂配置策略研究[J].储能科学与技术,2025,14(7):2801-2812.
SUN H, XING Z X, WU W N, et al. Research on configuration strategy of wind-solar-storage-hydrogen hybrid power plant considering power market trading mechanism[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2801-2812.

[64] Zhao X , Li N , Mu H , et al. Optimization of Industrial Park Integrated Energy System Considering Carbon Trading and Supply–Demand Response[J].Energies,2025,19(1):117-117.

[65] 崔杨,姜帅,付小标,等.碳市场激励下考虑低碳用能转移的综合能源系统优化调度策略[J].电网技术,2025,49(08):3324-3333.
CUI Y, JIANG S, FU X B, et al. Optimization scheduling strategy of integrated energy system considering low-carbon energy use transfer under carbon market incentives[J]. Power System Technology, 2025, 49(08): 3324-3333.

[66] 杨晓辉,邓叶恒,王晓鹏,等.基于碳交易-绿色证书联合交易机制的含CHP-CCS-P2G耦合的区域综合能源系统低碳经济调度[J].太阳能学报,2024,45(06):244-254.
YANG X H, DENG Y H, WANG X P, et al. Low-carbon economic dispatch of regional integrated energy system with CHP-CCS-P2G coupling based on carbon trading-green certificate joint trading mechanism[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45 (06): 244-254.

[67] 李军祥,刘艳丽,王溪.基于信息间隙决策理论的绿证实时定价问题研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(24):32-43.
LI J X, LIU Y L, WANG X. Research on real-time pricing of green certificates based on information gap decision theory[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 32-43.

[68] 郑新宇,徐咏,谢睿杰,等.中国氢能发展路径及突破口:基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示[J].储能科学与技术,2025,14(12):4654-4671.
ZHENG X Y, XU Y, XIE R J, et al. Development path and breakthrough of hydrogen energy in China: Enlightenment based on the strategic transformation of hydrogen energy and development differences of hydrogen energy between China and the United States[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(12): 4654-4671.

[69] 万燕鸣,熊亚林,王雪颖.全球主要国家氢能发展战略分析[J].储能科学与技术,2022,11(10):3401-3410.
WAN Y M, XIONG Y L, WANG X Y. Analysis on hydrogen energy development strategies of major countries worldwide[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3401-3410.

[70] 卢佳富,梁宁,徐慧慧,等.计及动态绿证-碳排协同交易机制的含氢综合能源系统鲁棒优化调度[J].电力系统保护与控制,2025,53(22):43-54.
LU J F, LIANG N, XU H H, et al. Robust optimal dispatch of hydrogen integrated energy system considering dynamic green certificate-carbon emission synergistic trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 43-54.

[71] 黄松涛,董金星,赵雪楠,等.考虑多主体碳交易成本分摊的综合能源系统低碳经济调度[J].电力工程技术,2025,44(03):120-130.
HUANG Songtao, DONG Jinxing, ZHAO Xuenan, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy systems considering multi-agent carbon trading cost sharing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(03): 120-130.

[72] 李丹阳,刘鸿鹏,韩旭,等.考虑新能源市场容量价格的新型电力现货市场交易机制设计[J].电力自动化设备,2026,46(02):194-204.
LI D Y, LIU H P, HAN X, et al. Design of trading mechanism for new-type electricity spot market considering capacity price of new energy market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46 (02): 194-204.

[73] 龚泳国,曾林俊,陈荐,等.考虑碳交易与绿证不确定性的综合能源系统双层博弈优化调度[J].电力建设,2025,46(12):119-130.
GONG Y G, ZENG L J, CHEN J, et al. Bi-level game optimal scheduling of integrated energy system considering uncertainties of carbon trading and green certificate [J]. Electric Power Construction, 2025, 46 (12): 119-130.

[74] 周步祥,蔡宇豪,邱一苇,等.考虑电、氢、氨市场的可再生能源电制氢合成氨系统多主体合作运行策略[J].电力建设,2024,45(11):50-64.
ZHOU Buxiang, CAI Yuhao, QIU Yiwei, et al. Cooperative operation strategy of renewable electricity–hydrogen–ammonia systems considering electricity, hydrogen and ammonia markets [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 50-64.

[75] Liu C, Wang C, Yao W, et al. Distributed low-carbon economic dispatching for multiple park-level integrated energy systems based on improved shapley value[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024.

[76] 郑峰,孙电,黄丽丽,等.基于混合博弈强化学习的虚拟电厂市场交易策略[J].中国电力,2026,59(03):94-102.
ZHENG F, SUN D, HUANG L L, et al. Market trading strategy of

virtual power plant based on hybrid game reinforcement learning [J]. Electric Power, 2026, 59 (03): 94-102.

[77] 庞超,霍现旭,王智爽,等.面向用户隐私保护的综合能源系统博弈与强化学习协同调度方法[J/OL].电力系统及其自动化学报,1-13[2026-04-28].
PANG C, HUO X X, WANG Z S, et al. Collaborative scheduling method of integrated energy system combining game theory and reinforcement learning for user privacy protection [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1-13 [2026-04-28].

[78] 刘双硕,李笑竹,李建林,等.不对称信息下的新能源场站群共享储能运营机制[J/OL].电力系统自动化,1-12[2026-05-29].https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260519.1329.002.
LIU S S, LI X Z, LI J L, et al. Operation mechanism of shared energy storage for new energy station clusters under asymmetric information[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-12 [2026-05-28].

[79] 陈曦,彭泓华,刘一钟,等.考虑信息不对称的综合能源系统运营商鲁棒定价策略[J].南方电网技术,2024,18(1):102-110+133.
CHEN X, PENG H H, LIU Y Z, et al. Robust pricing strategy for integrated energy system operators considering information asymmetry[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 102-110+133.