第 50 卷 第 4 期：1357-1376　　高电压技术　　Vol.50, No.4: 1357-1376
2024 年 4 月 30 日　　High Voltage Engineering　　April 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240252

城市综合能源系统协同调控与互动交易研究综述

马恒瑞[1,2,3]，王　波[1,2]，王　蔚[1,2]，董旭柱[1,2]，刘书福[3]，丁书伟[3]
（1. 交直流智能配电网湖北省工程中心，武汉 430072；2. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；
3. 新能源电力系统智慧运行教育部重点实验室(青海大学能源与电气工程学院)，西宁 810016）

摘　要：城市是工业、服务业的聚集地，是经济增长的主引擎，未来城市综合能源系统的发展目标将不仅仅局限于满足社会能源需求，还需要将视角提升到支撑城市全局发展层面。因此，城市综合能源系统协同调控与互动交易相关研究不仅是近年来研究的热点问题，也是促进人类和城市可持续发展的必要解决问题。该文首先分析了相关研究的发展趋势和发文热度。然后在模型层面，分别讨论了城市综合能源系统的基本协同调控模型以及满足零碳需求、韧性提升需求、互动交易场景下的协同调控模型；在决策框架和算法层面，就目前常用的双层优化、鲁棒优化、人工智能优化方法分别进行概括分析；对城市综合能源系统仿真软件的特点进行了归纳总结。最后，对城市综合能源系统中多能源协同运行灵活性潜力挖掘、全设备模型建模方法与信息交换技术、多元用户互动特性分析、信息-物理-社会深度融合的需求和挑战进行了展望。

关键词：城市综合能源系统；协同调控；互动交易；模型；决策框架；求解方法

Review of Collaborative Regulation and Interactive Trading of Urban Integrated Energy System

MA Hengrui[1,2,3], WANG Bo[1,2], WANG Wei[1,2], DONG Xuzhu[1,2], LIU Shufu[3], DING Shuwei[3]
(1. Hubei Engineering and Technology Research Center for AC/DC Intelligent Distribution Network, Wuhan 430072, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Key Laboratory of Intelligent Operation of New Energy Power System of Ministry of Education, School of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract：Cities are the hub of industry and service industry, serving as the main engine of economic growth. The development goal of the future urban integrated energy system should not only be confined to meeting the energy demands of society but also support the overall development of the city. Therefore, collaborative regulation and interactive trading of urban integrated energy systems is not only a current hot topic but also a necessary solution to promote sustainable development for both humans and cities. First，we present an analysis of the current trends and popularity of research related to urban integrated energy systems. Additionally, at the model level, we discuss the basic co-regulation model of urban integrated energy systems and the co-regulation model to meet zero-carbon demands, resilience enhancement demands, and interactive trading scenarios, respectively. At the decision framework and algorithm level, we summarize and analyze the commonly used two-layer optimization, robust optimization, and artificial intelligence optimization methods. The characteristics of the commonly used simulation software for urban integrated energy system are also summarized. Finally, we put forward the prospects in the needs and challenges of multi-energy complementary potential mining, all-equipment modeling method and information exchange technology, multi-user interaction analysis, and information-physical-social deep integration in urban integrated energy systems.

Key words：urban integrated energy system; collaborative regulation; interactive trading; modeling; decision framework; solution method

0　引言

城市是能源消费的中心，城市的面积占地球表面不到 1%，却消耗了全球 76%的煤炭、63%的石油和 82%的天然气[1]。中国的城市化率从 2000 年的 36%快速上升至目前的 57%，并保持继续增长态势，预计 2040 年将达到 75%[2]。中国城市的能源消耗占全部能源消耗比例为 85%，超出世界 67%平均水平近 20%。尤其是在双碳目标与能源双控背景下，我

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2401300)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401300).

国城市能源消费占比和碳排放占比均超过 70%，是我国碳达峰、碳中和的主阵地。为实现我国“双碳”目标，推动经济社会全面绿色转型，各个城市需要选择具有可实施性、满足城市发展需求的能源转型路径[3-6]。目前，城市建设与运行的信息化、数字化水平快速提升，以此为基础在横向打通能源、交通、市政等城市各领域间的信息壁垒，在纵向实现城市从上层规划建设到底层公众服务的整体协调统一，为建设高效、绿色和共享的城市综合能源系统(urban integrated energy system, UIES)奠定了基础。UIES 可以有效挖掘电-热-冷-气-氢-储耦合灵活性，是解决新能源消纳与安全保供难题、提升城市综合供能安全、实现双碳目标的重要途径。

目前，UIES 需要重点关注 3 方面的发展需求：

1）打造绿色低碳的城市能源消费格局

全球已有数百座城市承诺 100%使用可再生能源电力，研究指出：通过对上海、天津、深圳、重庆的部分城市商业建筑进行用能设施进行改造后。构建 UIES 可以达到 20%左右的能效优化[7-9]。我国各城市 2021 年国民经济和社会发展统计公报及政府网站公布的数据显示，我国典型城市的城镇化率、三次产业结构等关键特征虽然各具特点，但是都以第二产业(包括工业和建筑业)和第三产业(服务业)为主。在此种用能需求下，UIES 上承能源生产输送基地，下接能源“产消用”一体的建筑、交通和工业用户。“源网荷储”一体的综合能源系统具有多能耦合特性，可以实现高、低品位多种能源之间的高效转换，满足低碳零碳用能需求，逐步实现负碳能源循环发展的理念，构筑起支持能源高效、环境友好、安全经济的新型能源体系，为地区经济发展提供强劲动力和增量空间[10]。

2）构建安全韧性的能源供应体系

能源是城市正常运转的物质基础和基本保障，城市建设、经济发展和市民生活与能源供给保障息息相关，能源供给是否安全可靠已经成为城市营商环境优劣和宜居性的重要影响因素。近年来，随着气候变化对能源系统影响广度和深度的不断拓展，城市能源供给保障问题日益突出，城市能源系统可持续发展面临更多挑战。2019 年 8 月，台风“利奇马”登陆东部沿海，造成多个城市供电设施受损[11]；2020 年 12 月，湖南受入冬早、降温快且持续低温天气影响，城市用电负荷突破冬季最高纪录；2021 年 7 月，河南遭遇强降雨天气，郑州等城市供电保障承压[12]；2022 年夏季，四川遭遇历史性高温热浪，成都高峰期空调用电负荷一度占到全市电力负荷的 40%~50%，部分时段产业用电、市政用电受限[13]。因此，构建坚强智能的城市能源供给体系，提升天然气管网互联互通和应急响应能力；提升电网运行灵活性和响应韧性，推进配电网、集中供热供冷等能源基础设施建设；充分开发利用本地清洁能源，包括分布式光伏、分布式风电、垃圾发电等，通过建设多种能源协同、供给与消费协同、集中式与分布式协同的新型生态化能源系统，在外部主电网故障或其他极端故障场景下实现重要负荷的持续、可靠供能是 UIES 研究热点之一。

3）塑造多元共享的能源服务品质

从电力行业来看，近 2 年电力安全保供压力增大。供给侧：2022 年部分流域出现来水偏少，水电出力受限；消费侧：极端天气导致空调负荷激增，双向作用导致电力供需形势紧张。相关部门积极推进电力市场化建设，多渠道化解电力供应紧张风险、实现电力供需平衡，也为行业主体提供了参与机会。综合能源服务商基于原有业务，为客户延伸提供市场化电力交易代理服务，2022 年各电力交易中心总交易电量完成 55 902 亿 kWh，同比增长 3.5%，其中，市场交易电量 41 283 亿 kWh，同比增长 43%。为充分挖掘 UIES 中的用户侧可调节资源、降低电力尖峰负荷和峰谷差，需求响应市场机制不断完善，增加市场参与主体，降低参与门槛。城市综合能源服务商基于原有业务，接入多元化用户、可控电源、可调节负荷等，可以延伸开展需求响应代理服务，赚取需求响应补贴，与用户分成，实现双赢。

围绕上述需求，本文从协同调控模型、决策框架及求解方法、仿真软件等方面对研究现状进行了梳理，介绍了相关研究进展和主要技术路线。最后对目前存在的问题进行归纳并展望了未来的研究方向。

1 UIES 协同调控研究概述

1.1 UIES 典型架构及特征

UIES 一般以配电系统为核心，集成电、热、冷、气、氢等异质载体，能够提高系统整体的能源利用效率，促进高比例新能源发电消纳，典型的 UIES 示意图如附录 A 图 A1 所示。UIES 一般由分布式能源单元、冷热电三联供系统(combined cooling heating and power, CCHP)、天然气网以及城市配电网 4 个模块构成，包含电、热、冷、气 4 种主要负

荷以及氢负荷。UIES 中分布式能源单元的设备类型包括电储能、电转气(power to gas, P2G)设备、光伏发电机组、风电机组等；CCHP 系统的设备类型包括火电机组、燃气轮机、电储能、光伏发电机组、燃气锅炉、余热回收锅炉、电制冷机、吸附式制冷机等；天然气网包括压缩机等。整个系统在能流传递过程中，以信息流方式将多能数据传输到城市能量管理系统，实现系统多能实时、灵活控制。

1.2　UIES 协同调控与互动交易研究概况

图 1 对当前 UIES 协同调控与互动交易的研究成果关键词的分布情况、发表期刊的分布情况、发表时间进行了数据整理和图形化展示。自 2015 年贾宏杰提出了区域综合能源系统这一概念后[14]，大量成果在 3 年内发表，此后一直成为了研究的热门问题，并在国内外顶刊上都持续有相关成果发布。

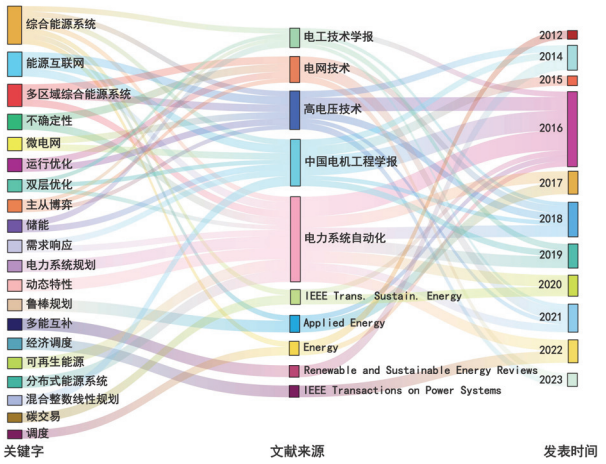


图 1　UIES 协同调控与互动交易研究综述相关文献分布

Fig.1　Distribution of collaborative regulation and interactive trading releated research reviews

2　UIES 的协同调控模型

2.1　基本协同调控模型

根据建模思路的不同，UIES 基本协同调控模型可分为 3 类：基于系统约束的 UIES 模型、基于统一能路的 UIES 模型以及数据-知识融合驱动下的 UIES 模型。

2.1.1　基于系统运行约束的 UIES 模型

按照 UIES 内设备所述能源子系统的不同，可以将设备分为单一系统内设备单元和耦合系统内设备单元。不同优化协同调控情况下需要设置与之相匹配的目标函数，不同单元组成 UIES 需要确定不同的约束条件。表 1 总结了不同协同调控情况下 UIES 的目标函数和约束条件[15-19]。

表 1　基于系统运行约束的 UIES 模型

Table 1　UIES model based on system operational constrains

文献编号	协同调控目标	约束条件
[15]	最优运行成本	功率平衡约束 设备运行约束 储能运行约束 备用约束
[16]	最优运行成本， 最大可再生能源利用率	需求响应前后电量约束 任意时段负荷转移上限约束 峰谷电价比约束 用户用电方式满意度约束 用户电价支出约束 功率平衡约束 可控机组出力约束 联络线传输功率约束 储能装置约束
[17]	最优运行成本， 最低碳交易成本	机组能量转换约束 爬坡约束 储能运行约束
[18]	最优运行成本， 最大风光消纳率	功率平衡约束 节点电压约束 支路功率传输约束
[19]	最低购能成本， 最低可中断负荷补偿成本	设备运行约束 储能约束 需求响应约束 功率平衡约束

2.1.2　基于统一能路的 UIES 模型

基于统一能路的 UIES 模型与基于系统运行约束的 UIES 模型相比，对于耦合设备单元的建模更加精细。其主要思路是：获取不同类型热电联产机组、燃气锅炉、热回收装置、储热装置制冷装置的输入输出特性，建立能源系统内各类装备的能流转换模型，形成综合能源系统(包含各独立网络与整体)的统一模型，利用矩阵方法进行系统化整体建模，并用统一的方式描述不同类型能源的能量转换和流动，形成整体能源系统的物理方程约束。基于统一能路的 UIES 模型从统一形式上可以分为频域的统一能路理论和时域统一模型 2 种[20-21]。

清华大学团队提出综合能源系统分析的统一能路理论及其优化调度方法是借鉴基础电路理论导出电力、热力、天然气的统一能路[22-25]，为潮流分析、灵敏度分析、短路电流计算和安全约束经济调度等一系列网络分析应用提供了理论基础。

东南大学团队基于源荷二端口网络等值的思想建立了综合能源系统时域统一模型，并将时域模型与频域模型进行了对比，总结得出时域模型的计算精度与复杂度取决于时空差分步长的选择，频域

模型的计算精度与复杂度取决于初始、边界条件的近似以及频率分量的叠加。时域模型在网络长度较大的仿真中具有计算效率优势，频域模型在周期较长的仿真中具有计算效率优势[20,26]。

2.1.3 数据-知识融合驱动下的 UIES 模型

智慧城市的建设为 UIES 提供了海量的传感器以及全面的信息链接，获取了可以用来反映系统运行状态的数据库，为构建数据-知识融合驱动方法的 UIES 模型提供了基础。与模型驱动下的 UIES 模型相比，数据-知识融合驱动的 UIES 模型具有忽略系统内在运行物理规律、建模过程简单的优点。但是，数据-知识融合驱动下的 UIES 模型依赖大量的数据导致其对于数据的质量要求很高，并且模型的可解释性差。为解决这一问题，有专家学者考虑利用多参量数据融合来表征 UIES 特性。

多参量数据融合可分为 3 个层次：数据级融合、结构级融合和决策级融合，各层次之间没有明确的界限[27-28]。数据级融合是最低层次的融合，其直接对多参量数据进行融合。文献[29]利用多参量融合进行 UIES 负荷预测，首先将负荷时刻、星期数、是否为节假日等信息进行归一化处理并以矩阵形式表示，然后将特征矩阵分别输入 3 个 GRU 网络进行负荷预测，最后通过随机森林模型对各预测结果进行融合，该过程可认为是决策级数据融合。特征级融合是中间层次的融合，先依据数据特征对每类数据源分别进行特征提取，然后对各数据特征进行融合并进一步进行目标感知，获得对目标对象的统一解释。文献[30]综合考虑用电量高峰、用电量低谷、升降趋势及季节和月份等特征，提出了多组基于记忆长短期信息的能力的神经网络(long short term memory, LSTM)和门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)的残差修正负荷预测模型，并对各模型预测结果进行组合，实现了决策级融合的负荷预测；文献[31]通过分析关键天气因素，提出了一种基于数据的光伏发电量预测方法；文献[32]通过互信息和交互增益准则过滤无效输入特征后，以此作为人工神经网络(artificial neural network, ANN)的输入变量预测光伏发电功率，此类模型相较于时间序列预测提高了其可解释性，但由于所建仍为黑箱模型，可解释性要低于机理模型。

尽管多参量数据融合已在多个学科取得了较好的成果，但在 UIES 中的应用还是需求和挑战并存：一方面，云计算、大数据、物联网和移动互联网等技术正逐渐渗透到 UIES 中[33]，UIES 中各类、大量的数据交融在一起，为目标对象的全面准确认知提供了数据基础[34]，同时在信息-物理-社会网络的复杂耦合下，UIES 中的融合感知成为对目标进行有效分析的必要手段；另一方面，UIES 是一个复杂的高阶动态系统[35]，其运行方式有不确定性，存在大量具有分散性、多样性、随机性、复杂性和关联性的多源异构数据，但目前电力系统中跨类型的数据分析技术薄弱，状态量间的关联分析挖掘能力不足，现阶段仍以知识逻辑为主导的单一状态数据分析为主，跨领域、多维度、长时间的多维数据综合分析与运维研判能力缺失，相关技术实用化、智慧化程度较低，前后端融合薄弱，给异构多参量数据融合带来了挑战[36]。

2.2 考虑零碳的协同调控模型

根据联合国气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)统计，如表 2 所示，城市中人类活动产生的 CO_2 排放量有 75%以上来自能源领域[37]，附录 A 图 A2 为某城市的能耗结构及其主要碳排放来源。为推动城市能源供应低碳化发展，我国近年来发布了一系列相关政策，如表 3 所示。

UIES 可以充分利用各种能源子系统在时间和空间上的耦合特性，采取多种技术减少、补偿和中和 CO_2。以减碳设备为核心的碳捕集、利用与封存技术，多能互补技术，可以促进可再生能源消纳、减少区域内化石能源用量、降低温室气体排放强度，实现绿色低碳发展[38]。表 4 总结了近年来零碳 UIES 协同调控的技术创新。

2.2.1 以减碳设备为核心的协同调控模型

碳捕集、利用与封存(carbon capture utilization and storage, CCUS)是指将二氧化碳从工业过程、能源利用中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现 CO_2 永久减排的过程。按照技术流程，CCUS 主要分为碳捕集、碳运输、碳利用、碳封存等环节。

表 2 城市排放温室气体的领域

Table 2 Field of greenhouse gas emission in city

活动	内容
能源领域	能源生产/加工转换及输配过程，其中以发电和热力供应为主
交通运输	交通工具及其他移动设备终端消费化石燃油过程，以及城市公共交通系统中电力和燃油消费
建筑	居民或商业建筑等的终端消费能源过程
工业	工业生产过程中的终端消费能源过程

表 3　2019 年以来城市能源供应低碳化相关政策

Table 3　Policies related to the low-carbonization of urban energy supply since 2019

发布时间	发布部门	政策文件名称	主要内容
2019 年 5 月	国家发展改革委 国家能源局	《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》	建立健全可再生能源电力消纳保障机制，确保完成全国能源消耗总量和强度“双控”目标
2019 年 7 月	工业和信息化部	《关于印发工业领域电力需求侧管理工作指南的通知》	建立健全工业领域电力需求侧管理工作规范，加强电能管理，调整用能结构，提高终端用电效率，持续提高单位工业增加值能效，实现节约、环保、绿色、智能、有序用电
2019 年 10 月	国家发展改革委	关于印发《绿色生活创建行动总体方案》的通知	明确在创建节约型机关、绿色家庭、绿色社区、绿色商场的过程中强化能耗管理，提高能源资源利用效率，加强绿色建筑运行管理，积极采用合同能源管理
2020 年 7 月	国家发展改革委	《关于组织开展绿色产业示范基地建设的通知》	推动能源梯级利用，积极开展能源托管服务
2021 年 2 月	国家发展改革委 国家能源局	《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》	积极实施存量“风光水火储一体化”提升，稳妥推进增量“风光水(储)一体化”，探索增量“风光储一体化”
2021 年 7 月	国家能源局综合司	《关于推进 2021 年度电力源网荷储一体化和多能互补发展工作的通知》	以需求为导向，优先考虑含光热发电、氢能制氢储用，梯级电站储能、抽汽储能、电化学储能、压缩空气储能、飞轮储能等新型储能示范的“一体化”项目

现阶段碳封存的价格在 500 元/t 左右，很难体现出经济效益，因此将 CCUS 与将 P2G 相结合，构建 CCUS 和 P2G 协同的 UIES，可以在减少系统的碳排放量的同时提高运行经济性。

文献[39]构建了计及 CCUS-P2G 联合运行的日前-日内-实时不同时间尺度下的 IES 运行优化策略，其算例表明该策略利用碳捕集电厂实现了碳利用的时移，提升了 IES 的运行灵活性。文献[40]将混氢燃气轮机、氢燃料电池、气网掺氢等环节纳入了协同调控的考虑范围内，分析了掺氢对 IES 运行经济性和低碳性的影响，为合理选择气网掺氢比上限、制定动态掺氢策略提供了参考。文献[41]在以基于系统运行约束的 IES 模型中加入 CCUS-P2G 耦合单元，提升了可再生能源效率的同时降低了碳排放。文献[42]构建了考虑需求响应的含 CCUS-P2G 的 IES，目的是利用价格型和激励型需求响应实现系统经济低碳运行。文献[43]将光热电站纳入了协同调控体系，建立了光热电站(concentrating solar power, CSP)-热电联产(combined heat and power, CHP)-碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)协同框架。文献[44]在传统碳交易的基础上构建奖惩阶梯型碳交易模型的基础上考虑了来自源荷两侧的不确定性，提出了基于可信性理论的综合能源系统模糊机会约束调度模型。

2.2.2　以多能互补为核心的协同调控模型

多能互补是实现 UIES 零碳运行的另一主要手段[45-46]。通过在多时间尺度上实现对多种能源生产、传输、转换、储存、消耗环节的有机组合，提升能源的使用效率、降低排放[47]。

文献[48]构建了一个多区域、多类型储能能量协同运行的 UIES 优化模型，对系统内用能成本、一次能源消耗、碳排放强度进行了优化，为近零碳社区运行提供了解决思路。文献[49]提出了一种考虑多能互补灵活性和用户低碳意愿的鲁棒优化方法，根据用户零碳偏好支付系数、政府补贴系数以及普通电能和零碳电能价格制定了个性化的用能套餐。文献[50]制定了一种考虑多能品味互补的规划策略，通过提升系统经济性、降低能源运送损失来提升能源利用效率，降低碳排。文献[51]将储能的定义扩大到了用户侧的各类灵活性资源，提高系统设备利用率。文献[52]提出了一种考虑电-气-热-氢需求响应和阶梯式碳排放成本机制的多时间尺度低碳运行优化策略，以实现综合能源系统的低碳经济运行，验证了多能互补在促进低碳运行、充分发挥系统设备灵活性和促进清洁能源消纳方面的有效性。文献[53]考虑到多种能源需求的响应，提出了 IES 的日前能源定价和管理模型。该模型是一个双层 Stackelberg 博弈优化模型，上层考虑能源服务提供商的利润最大化，下层考虑能源消费者的成本最小化。

2.3　考虑韧性提升的协同模型

韧性最初的概念是由加拿大生物学家 Holling 于 1973 年提出的，用来衡量生态系统抵御干扰并保持原有状态的能力[54]。根据电气与电子工程师协会电力和能源社会工作组定义和量化的韧性，韧性的是指承受能力的大小和/或持续时间，减少破坏性事

表 4 零碳 UIES 的技术创新

Table 4 Technological innovation of zero-carbon UIES

策略类型	文献	技术创新	使用方法
引入减碳设备	[39]	构建碳捕集电厂和电转气设备的新型联合运行模型	提出源荷互补的综合能源系统多时间尺度低碳调度策略，构建含综合需求响应的日前-日内-实时调度模型
	[40]	建立基于动态掺氢的管道运维成本模型	构建考虑气网掺氢管道运维成本的综合能源系统低碳经济调度模型，利用 McCormick 松弛方法将非线性问题转化为线性问题
	[41]	以碳捕集和电转气设备为耦合单元	考虑奖惩阶梯式碳交易机制对 CMIES 低碳经济调度的影响
	[42]	建立碳捕集电厂综合灵活运行模型	提出碳捕集电厂-氢能利用的联合灵活运行模型，构建计及价格型、激励型的综合需求响应模型
	[43]	引入光热电站	构成 CSP-CHP-CCS 协同框架，并建立含 CSP-CHP-CCS 的 IES 低碳经济调度模型
	[44]	含 P2G-碳捕集综合能源系统机会模糊调度模型	在传统碳交易的基础上构建奖惩阶梯型碳交易模型，以进一步限制系统的碳排放
利用多能互补	[48]	多区域能量共享、多储能的综合能源系统的非线性协同优化模型	由相邻的近零能耗建筑组成的近零能源社区，可以有效降低建筑的运行能耗
	[49]	计及用户低碳意愿对新能源消纳的影响，构建用户购买普通和零碳电能的效用函数	引入设备最优运行区间对模型内时间耦合约束进行解耦，并采用 KKT 条件和嵌套列与约束生成算法进行求解
	[50]	构建了一种集中-分布式能源站结构	以最小化系统总体成本为目标函数，建立 IES 分级规划模型，确定系统中各能源站的设备配置情况与线路规划情况
	[51]	将多类型储能和用户侧灵活性负荷视为广义储能资源	通过对广义储能系统储放能优化调度，在满足各类负荷用能需求的基础上，实现系统能量的优化分配
	[52]	建立了日前、日内、滚动和实时 3 个阶段的多时间尺度优化模型	以 IES 的总体运行成本、碳排放成本、弃风弃光成本为经济目标，将原来的非线性问题转化为混合整数线性问题
	[53]	建立了数据中心、电动汽车和空调负荷的多能源需求响应模型。考虑到多种能源需求的响应	该方案既有利于能源服务提供商，也有利于能源消费者，提高了 IES 的经济性和协同运行效果，减少碳排放

件发生，其中包括预测的能力、吸收、迅速适应和/或恢复此类事件[55]。然而，这些定义有一个共同的理解，即关注基础设施或系统准备和适应低概率高影响事件的能力以及承受中断并迅速恢复的能力。UIES 的韧性提升对于保证城市中各类重要负荷的功能，提高城市对于极端天气的抵御能力有着及其重要的作用。表 5 总结了近年来考虑韧性提升的 UIES 协同调控的技术创新。

2.3.1 以分布式资源为核心的协同调控模型

文献[56]利用分布式可再生能源、储能系统和柴油发电机增强医院在意外停电期间的恢复能力，并且给出了最佳经济性配置。文献[57]以飓风作为极端事件开展了相关研究，根据高精度的时空飓风影响分析模型开发了一个随机混合整数二次规划模型，用于在飓风来临前共同优化分布式储能和分布式发电的恢复顺序，同时最大限度地减少未作为衡量恢复力指标的预期能源成本。文献[58]将电网发生故障后抢险人员的交通时间纳入了模型中，以优化负荷供电恢复顺序。文献[59]为了有效地从大规模停电中恢复电力用户，将维修人员和修复人员调度模型集成到灾难恢复方案中，生成分布式发电、可控负载和远程/手动开关的最佳控制动作序列。

2.3.2 以电、气、热多能耦合为核心的协同调控模型

文献[60]制定了住宅区、工业区在停电和停天然气情况下，利用电、气、热多能耦合提升系统韧性的运行策略。文献[61]利用多类型分布式能源(如燃料电池、储氢罐、电池存储和储热单元)的协同作用开发了一种规避风险的后退时域方法来处理网络突发事件的不确定性，并支持主动和应急调度的最优决策。文献[62]提出了一个电力和天然气网络日前调度的优化模型，所提出的模型在确定性和随机性模式下分别降低了 5.1%和 4.8%的运营成本，并且当系统出现灾害时利用 P2G 系统降低了约 1429 kW 的负载损失。文献[63]提出了一种混合整数非线性规划框架，使用基于场景的方法来处理负荷需求、风速和太阳辐射的不确定性。所提出的模型在中尺度和大尺度系统上都得到了实现，增强了系统韧性。文献[64]通过优化热电联产的规模、选址和运行，以应对系统内所有电力线(电网的 32 条线路)可能发生的停电事件。

2.4 考虑互动交易的协同调控模型

电力市场是我国统一开放、竞争有序的现代市

表 5　UIES 韧性提升的技术创新

Table 5　Technological innovation for UIES resilience enhancement

策略类型	文献	技术创新	使用方法
引入分布式电源	[56]	分布式可再生能源、储能系统和柴油发电机协同应用	在 1 年的周期内，随机设置意外停电，制定分布式资源的最优配置和协同调控策略
	[57]	高精度的时空飓风影响分析型	该模型可以有效利用电网资源提高关键负荷的恢复能力，从而提高 UIES 在应对飓风引发的停电时的性能
	[58]	考虑抢险人员的交通时间	构造了一个随机混合整数线性规划模型，以增强配电系统应对灾难性事件的弹性
	[59]	一种新的用于配电系统的最优灾难恢复的混合整数线性规划模型	为了解决模型制定中与时间尺度相匹配的问题，将协同优化问题转化为具有可变时间步长的“基于事件”模型
电、气、热多能耦合为核心	[60]	不同区域停电、停气	电池、柴油和 CHP 均考虑有功和无功功率。模拟和比较不同配置情况下的购买能源、天然气等其他成本以及负荷恢复率
	[61]	多类型分布式能源的协同作用	建立以提升韧性为导向的综合氢-电-热微电网供电工业园区运营模型，提高应急状态下的负载生存能力
	[62]	考虑了电力、制冷、供暖负荷、可再生能源输出功率和价格的不确定性	建模为混合整数非线性规划问题，并使用 GAMS 软件中的 DICOPT 求解器进行求解
	[63]	构建了不同负荷供应优先级的住宅、商业和工业能源中心模型	在线路停运期间，高优先级负荷随时减少了约 66%
	[64]	风险分为作为单个事件和连续事件应用于系统	风险划分为上游电网停电、热电联产停电和电力线停电 3 种。创建的微电网可以在不同的单次和多次停电下改变其结构

场体系的重要组成部分。自 2015 年《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》实施以来，我国电力市场建设持续向纵深推进，并取得了显著成效。“统一市场、两级运作”的市场总体框架基本建成，形成覆盖省内省间，包括中长期、现货、辅助服务的全周期全品种市场体系，多主体互动交易也逐步成为了新型电力市场的重要研究方向。

我国近年来与 UIES 相关的市场化改革领域的相关政策见表 6。传统的电力交易模式是单向的，即用户向电网购电。近年来，UIES 得到了长足发展，UIES 包含了在用户侧通过利用风能、光伏、生物质等分散资源独立发电的小型供能装置，此外，也可包括电动汽车和分布式储能等设备，因此它们除了向电网或储能电站进行购电以外，还可以在特定时段对外输出功率，可以被认为是一种产消者。

尽管 UIES 有上述一系列优点，但在实际参与互动交易中仍然面临以下挑战。首先，产消者内部安装的可再生设备容易受到运行环境的影响[65]，导致其稳定性下降；再者，小规模的产消者生产的电能较少，不足以达到参与市场交易的水平[66]，这进一步限制了产消者的互动交易；最后，多主体的互动交易是以价格为导向的行为，而我国国内市场目前主要采用分时电价及上网电价机制，这意味着产消者和上级电网之间只能以固定的电价进行交易，因而缺乏灵活性，可能不适用于互动交易市场[67]。

上述的前 2 个问题可以通过构建微网聚合体的方式解决，而第 3 点则依赖于构建开放合理的市场机制引导产消者的交易行为[68]。

和微网相比，UIES 具有稳定性、可靠性和灵活性方面的优势[69]，同时减小了远距离输电损耗[70]。UIES 的这些特性给产消者点对点能源交易(peer-to-peer transactive energy，P2P)提供了可能性[71]，它允许每个 UIES 和其他的“同行”进行能源交易，从而获得额外的收益[66]；此外，P2P 能源交易还能进一步提升微网运行灵活性和新能源的消纳能力[72]。

目前，基于多主体的 P2P 交易是电力市场的热门研究领域，并提出了若干协同策略。罗伊德•夏普利最早提出运用夏普利法进行合作联盟利益分配，在这种合作机制下，每个参与合作的个体的收益应与其在合作联盟中的投入对等，即所获收益应按边际贡献比例对合作联盟的收益进行分配，但是这种合作机制主要根据内部成员的排列组合进行成本计算，容易耗费较多的计算资源。因此，在合作博弈领域，学术界开始重点关注基于纳什谈判的合作博弈。文献[65]提出了多微网的日前 P2P 能源交互策略；文献[73]提出了基于范数约束两阶段鲁棒优化的多微网 P2P 互动交易模型；文献[74]提出了基于多产销者 P2P 能源交易的最优潮流模型，提升了经济效益。类似地，文献[75]提出了考虑电能和氢能 P2P 交易的 UIES 协同调控模型，并在氢能交易中引入交通模型，使求解结果更贴近实际。

表 6 2019 年以来与 UIES 相关的市场化改革领域的相关政策

Table 6 Relevant policies in the field of market-oriented reform related to UIES since 2019

发布时间	发布部门	政策文件名称	主要内容
2019 年 6 月	国家发改委	《关于全面放开经营性电力用户发用电计划的通知》	经营性电力用户的发用电计划原则上全部放开
2019 年 7 月	国家发展改革委、国家能源局	关于深化电力现货市场建设试点工作的意见的通知》	统筹协调电力现货市场衔接机制，统筹协调省间交易与省(区、市)现货市场，统筹协调电力中长期交易与现货市场，统筹协调电力辅助服务市场与现货市场
2020 年 2 月	国家能源局	《关于推进电力交易机构独立规范运行的实施意见的通知》	2022 年年底前，各地结合实际情况进一步规范完善市场框架、交易规则、交易品种等，适应区域经济一体化要求的电力市场初步形成。2025 年年底前，基本建成主体规范、功能完备、品种齐全、高效协同、全国统一的电力交易组织体系
2021 年 9 月	国家发展改革委、国家能源局	《关于绿色电力交易试点工作方案的复函》	首次提出绿色电力产品定义：绿色电力产品主要为风电和光伏发电企业上网电量，条件成熟时，可逐步扩大至符合条件的水电
2022 年 1 月	国家发展改革委、国家能源局	《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》	健全多层次统一电力市场体系，完善统一电力市场体系的功能，构建适应新型电力系统的市场机制。探索开展绿色电力交易，健全分布式发电市场化交易机制

上述文献所采用的模型属于合作博弈层面，参与合作的产销者群体在满足自身用电需求的前提下以合作的方式最大化联盟的收益。根据纳什谈判理论[76]，参与合作的产消者群体目标函数为：

$$\begin{cases} \max \ \prod_{J=1}^{m}\left(U_J - U_{J,0}^{*}\right) \\ \text{s.t.} \quad U_J - U_{J,0}^{*} \geq 0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：m 代表参与合作博弈的产消者总数；$U_{J,0}^{*}$ 代表联盟内部第 J 个产销者不参与 P2P 交易独立运行时的最优解，也称纳什谈判破裂点[77]；而 U_J 代表该产销者在参与合作后所得的利益，约束条件 $U_J - U_{J,0} \geq 0$ 表示任一产销者参与合作后所得利益不得低于合作之前的利益，只有该条件满足，产消者集群才能保证提高经济效益，从而参与合作。

式(1)代表纳什谈判的标准形式，通过其协调得到的各联盟成员合作收益基本处于同一水平波动且幅度不大，这可能会导致利益分配不合理，进而打击合作联盟部分主体的积极性。因为，为了保证电能交易的同时考虑公平合理的利益分配机制，文献[78]引入基于非对称纳什谈判模型，其具体的优化目标变为：

$$\begin{cases} \max \ \prod_{J=1}^{m}\left(U_J - U_{J,0}^{*}\right)^{d_J} \\ \text{s.t.} \quad U_J - U_{J,0}^{*} \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中：d_J 代表每个联盟成员的议价因子，一般来说>0。文献[79]表明，和标准的纳什谈判相比，非对称纳什谈判的电量子问题无需变化，并在附录 A 中给出了严格的数学证明；而电价子问题的求解直接受议价因子的影响，当议价因子越大，对应的联盟成员分配的利益越多。因此，议价因子的计算对合作博弈的利益分配至关重要。文献[78, 80-81]介绍了议价因子的典型计算方法，其主要思想是通过计算合作前后的收益变换率。文献[71]提出了一种基于模糊理论的新型议价因子计算方法；文献[79]则提出了一种基于互补功率的议价因子计算方法。在利益分配领域，未来可以进一步研究更具经济价值的议价因子计算方法，使得利益分配更为公平。

除去合作博弈外，不同主体也可以进行非合作博弈的能源互动交易，如文献[82]将共享储能、配电网运营商(distribution system operation, DSO)、充电站运营(charging station operation, CSO)结合，构建并证明了 3 者能源交互的均衡模型；文献[83]构建了 DSO-MGs 的分布鲁棒优化调度。和合作博弈相比，非合作博弈的主体互动一般不考虑独立运行的情况，而是在各主体建模时就直接涵盖所有耦合交互量，因此不需要计算谈判破裂点，也不存在交互前后的利益对比。

上述文献的互动交易通常包含较多对象，而这些对象一般属于不同的利益主体。为保护各主体的隐私性，一般采用分布式算法进行求解。和其余方法相比，交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)因其数学原理强，收敛性好等特点，被广泛应用在分布式优化领域。但是，文献[84]指出，ADMM 一般不适用于多主体耦合约束当参与分布式优化的主体数目在“three block”及以上的，ADMM 的收敛性无法保证。文献[85]提出了多种“三主体”ADMM 分布式算法的

改进形式用以解决这一问题。

此外，无论是对称或非对称的纳什谈判形式，针对的都是同一个级别下的主体，而实际市场交易会存在多层的交易体系[86-87]，对于单层主体的交互，现阶段基于 ADMM 的分布式模型可以较好地保护隐私性，然而，在多层互动交易的体系下，下层用户的内部信息往往需要提供给上层主体，这会导致上下主体的隐私泄露问题。可以采用类似文献[88]的方法，引入目标级联分析法(analytical target cascading, ATC)构建多层模型。

除了博弈论，拍卖理论也被广泛应用于多主体的能源互动[89-91]。文献[89]建立了一种连续双向拍卖机制实现了 P2P 能源交互；文献[90]提出了一种基于电价拍卖机制的微网群 P2P 交互模型；文献[91]引入了克拉克机制，并证明了在该机制下，微网参与电氢共享储能可以实现自身最大的社会效益。

3　UIES 协同调控决策框架及求解方法

UIES 协同调控模型的优化对象均具有不确定性，为考虑这些不确定性因素的影响，双层优化、鲁棒优化等决策框架在 UIES 的协同调控中得到了大量应用，但是由于决策框架、优化对象、不确定性因素的不同，需要选择合适的的求解方法，如表 7 所示[88,92-108]。下文主要按决策框架的构建方法进行分类介绍。

3.1　双层优化

在通常情况下，UIES 在当地电力市场占据主导地位，而其余主体只能根据 IES 制定的变量来优化自身策略(如微网会根据分布式系统制定的电价来调整自身购售电策略，从而实现自身利益最大化等目的)。文献[92]提出了一种基于分布网络运营商-电动汽车集群的双层优化框架，其中上层主体为 DSO 而下层为电动汽车集群，并采用 KKT 条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)、强对偶以及大 M 法将该模型转换为单层优化问题进行求解，从而实现了 DSO 和 EVS 利益共赢。文献[88]采用了类似的双层优化框架，在下层汽车充电站之间引入合作博弈进行点对点能源交易，并采用交替方向乘子法求解，在保护下层主体隐私的基础上提升了经济效益。文献[93]提出了一种基于配电网重构的双层优化框架，下层的代理之间通过电能和热能的 P2P 交易提升了利益，而上层 DSO 基于下层能源交互结果对配电网实行重构。

表 7　UIES 协同调控决策框架及求解方法

Table 7　UIES collaborative regulation decision framework and solution methods

文献	决策框架	优化对象	不确定性因素				求解方法
			可再生	负荷	市场	模型元件	
[92]	双层优化	DSO+EVS	×	×	×	×	KKT 转换
[88]	双层优化+合作博弈	DSO+CSO	×	×	×	×	ATC+ADMM
[93]	双层优化+合作博弈	DSO+多智能体	×	×	×	×	KKT 转换+ADMM
[94]	两阶段随机优化	多微网系统	√	√	×	×	场景生成法
[95]	两阶段随机优化	多微网系统	√	√	×	√	场景生成法
[96]	两阶段鲁棒优化	机组组合	√	√	×	×	Benders 分解
[97]	两阶段鲁棒优化	机组组合	√	√	×	×	CCG
[98]	双层优化+合作博弈	多产销者主体	√	√	×	×	CCG+ADMM
[80]	两阶段鲁棒+合作博弈	多微网系统	√	√	×	×	CCG+ADMM
[99]	多阶段鲁棒	机组组合	√	√	×	×	FRDDP
[100]	多阶段鲁棒	地市输电系统	√	√	×	×	仿射变换
[101]	多阶段鲁棒	地市输电系统	√	√	×	×	RDDP+CCG
[102]	多阶段鲁棒	地市输电系统	√	√	×	×	RDDIP
[103]	两阶段鲁棒+DRCC	电-热	√	√	×	×	CCG
[104]	单层分布鲁棒优化+DRJCC	电热综合微网	√	√	×	√	DRCC 转换
[105]	两阶段分布鲁棒+双层优化	能源枢纽中心	√	√	×	×	改进的 CCG
[106]	两阶段分布鲁棒	DSO 备用容量	√	√	×	×	CCG
[107]	两阶段分布鲁棒	机组组合	√	√	×	×	改进的 CCG
[108]	单层分布鲁棒+DRCC	DSO+CSO	√	√	√	×	DRCC 转换
[109]	双层优化+分布鲁棒	DSO+CSO	√	√	√	×	KKT 转换
[110]	分布鲁棒+合作博弈	多互联微网	√	√	×	×	ADMM

注：×表示决策框架中未考虑该不确定因素；√表示决策框架中考虑该不确定因素。

3.2　鲁棒优化

为进一步考虑 UIES 内部机组转化效率、储能末态容量偏差以及购售电价、可再生能源出力等的多重不确定因素影响，可以利用随机优化[94-95]、鲁

棒优化和信息间隙决策等理论来解决这一问题[111]。鉴于现有理论的完善程度和使用难易程度来看，鲁棒优化[96-97]得到了最为广泛的应用。

3.2.1 两阶段鲁棒优化

和随机优化(stochastic optimization, SO)相反，鲁棒优化(robust optimization, RO)不需要对不确定主体进行分布假设，而是直接求解其可能发生的最恶劣情况。现阶段，许多文献已经将鲁棒优化和综合能源系统优化结合，致力于解决考虑新能源不确定性的综合能源优化运行等关键科学问题，而其中最经典的鲁棒优化模型是两阶段鲁棒优化。文献[96]建立了基于火电机组启停为决策变量的两阶段鲁棒优化；文献[98]结合风电、负荷的不确定集构建了双层规划的产销者模型；文献[80]提出了两阶段鲁棒优化的多微网点对点能源交易模型应对内部的可再生能源和电、热负荷不确定性。值得一提的是，在此文献中两阶段鲁棒优化的抽象形式为：

$$\begin{cases}\min\limits_{\boldsymbol{X}}\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}+\max\limits_{\boldsymbol{d}\in\boldsymbol{D}}\min\limits_{\boldsymbol{y}\in\mathcal{Q}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{d})}\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\right)\\ \text{s.t.}\begin{cases}\boldsymbol{CX}\le\boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{EX}+\boldsymbol{Fy}\le\boldsymbol{h}-\boldsymbol{Rd}\end{cases}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为日前阶段变量；$\boldsymbol{y}$ 为日内决策变量，主要包括日内的运行成本；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{h}$、$\boldsymbol{R}$ 为相关系数矩阵；$\boldsymbol{D}$ 为不确定集，可分为盒式不确定集、多面体不确定集、椭球不确定集以及基数不确定集等[112]。D 代表不确定主体决策变量，$\mathcal{Q}$ 代表决策变量 y 的可行域。

由式(3)可知，第 2 阶段是一个嵌套问题，通常在求解时利用 KKT 条件将嵌套结构等效为单层优化问题，但进行转换时通常会引入双线性项，增加问题求解难度。为解决这一问题，文献[96]采用 Benders 分解求解两阶段鲁棒优化，但 Benders 分解对子问题内部双线性项的处理较为粗糙，导致收敛精度不佳。文献[113]对双线性项进行松弛并采用空间分支定界法进行迭代求解，但是对于变量较多的大规模系统，该法计算成本较高。文献[97]提出了一种列与约束生成算法(column and constraint generation, CCG)，通过大 M 法将互补松弛条件转换为整数规划约束，能够得到比较精确的结果。文献[114]提出了一种嵌套的列与约束生成算法(nested-column and constraint generation, N-CCG)，可以求解第 2 阶段含有 0-1 变量的情况，当第 2 阶段优化模型包含储能、电动汽车等主体的充放电逻辑变量，一般采用该法进行求解。现阶段，列与约束生成算法已成为解决两阶段鲁棒优化最常用的算法之一。

3.2.2 多阶段鲁棒优化

文献[99]指出两阶段鲁棒模型中前一时刻的决策受到后一时刻的影响，这违背了决策的逻辑性。总的来说，未来时刻的决策会受到之前时刻的决策影响，但之前时刻的决策不应被后一时刻所影响。且系统在发生线路故障时，两阶段鲁棒容易造成无可行解，为了解决这些问题，研究人员将两阶段模型推广至多阶段鲁棒优化。

多阶段鲁棒的紧凑形式为：

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{X}}\begin{pmatrix}\boldsymbol{A}^{T}\boldsymbol{X}+\max\limits_{\boldsymbol{d}_1\in\boldsymbol{D}_1}\min\limits_{\boldsymbol{y}_1\in\mathcal{Q}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{d}_1)}\boldsymbol{b}_1^{T}\boldsymbol{y}_1+\\ \max\limits_{\boldsymbol{d}_2\in\boldsymbol{D}_2}\min\limits_{\boldsymbol{y}_2\in\mathcal{Q}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{d}_2)}\boldsymbol{b}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_2+\cdots+\\ \max\limits_{\boldsymbol{d}_T\in\boldsymbol{D}_T}\min\limits_{\boldsymbol{y}_T\in\mathcal{Q}(\boldsymbol{X},\boldsymbol{d}_T)}\boldsymbol{b}_T^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_T\end{pmatrix}\\ &\text{s.t.}\begin{cases}\boldsymbol{CX}\le\boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{EX}+\boldsymbol{F}_t\boldsymbol{y}_t\le\boldsymbol{h}_t-\boldsymbol{Rd}_t,\ 1\le t\le T\end{cases}\end{aligned}\tag{4}$$

式中：T 为决策总时段；$\boldsymbol{y}_t$ 为实时变量；$\boldsymbol{d}_t$ 为对应时刻的不确定变量；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{E}$ 为相关系数矩阵；$\boldsymbol{D}_t$、$\boldsymbol{F}_t$ 和 $\boldsymbol{h}_t$ 为各时段对应实时变量 $\boldsymbol{y}_t$ 的系数矩阵。和两阶段鲁棒相比，多阶段鲁棒模型更为复杂，求解方法主要包括仿射变换[100]和鲁棒对偶动态规划(robust dual dynamic programming, RDDP)[115] 2 大类。其中，仿射变换假设各时段的耦合变量和不确定主体之间呈线性关系，并将多阶段鲁棒转化为两阶段鲁棒模型求解。但是，现实中各时段耦合变量和不确定主体无法保证一定为线性关系[101]，因此通过仿射变换法得到的往往是局部最优解；此外，仿射变换的结果和前后时段选择了多少耦合变量直接相关。实际上，并不是所有当前时刻的变量会影响下一时刻。一般来说，“上一个时刻的变量出现在了下一个时刻的约束里”的是耦合变量。如果仿射变换法在此基础上进一步加入其余变量作为耦合变量，会得到不同的结果，且耦合变量的类型越多，求解结果越不准确。因此，仿射变换具有一定的局限性。而 RDDP 则采用“正向迭代找可行解，反向迭代修正函数值”的方法，在每一轮反向迭代中对每一时段 t 的最恶劣函数 $Q_{t+1}(y_t)$ 的上下界分别进行修正，并最终得到收敛结果，最劣函数的上下界会逐步逼近其真实的样子，并最终得到收敛结果。

以 T=23 为例，它所对应的最恶劣函数 $Q_{24}(y_{23})$ 在前 4 轮正向迭代过程的变化如图 2 所示。和仿射变换相比，RDDP 数学原理强，易于理解，当各时段内部存在 0-1 决策变量时，可采用改进的 RDDP 法进行求解[102]。但是，在日内调度时段较多的情况下，RDDP 所需的迭代时间成本较高，且当优化系统含有储能设备时，在第 1 次正向迭代过程中就有可能会存在某时刻 t 的最劣函数 $Q_{t+1}(y_t)$ 无可行解的情况，即相对完备性失效[115]，而这种情况通常是由于正向迭代中最后一个时刻 T 的优化模型的可行域内不存在令储能初、末容量相等的解，导致 RDDP 迭代失败。因此，现阶段仍然有必要对多阶段鲁棒进行更深层次的研究，如给出 RDDP 首次正向迭代的初始值寻优策略，或考虑末态储能容量在初值范围存在小范围波动的优化模型，从而避免算法失效。

无论具体形式如何，鲁棒优化的目标都是寻找 1 组最佳决策变量，使得它对应的最劣场景下的总成本最低。因此，当新能源或负荷的不确定集范围过大时，基于 RO 的决策也会非常保守，缺乏工程实用性(即最劣场景过分偏离实际工程)。

3.2.3　分布式鲁棒优化

而分布式鲁棒优化(distributed robust optimization, DRO)是近年发展起来的一种介于 SO 和 RO 之间的优化方法，它不需要对不确定主体进行分布假设，同时也能改善了 RO 极端场景造成的决策保守问题。DRO 的形式主要包括均值方差模型[103-104]，Wasserstein 球[116]和散度模型[105]。由于均值方差模型只应用了样本一阶矩和二阶矩的信息，且 2 者的大小可能会发生变化，因此不能较好地刻画不确定主体的真实分布；而采用散度模型会引入指数项，给计算求解带来困难。因此，DRO 的研究热点开始偏向于 Wasserstein 球，主要应用领域包括备用容量优化[106]、机组组合[107]以及多微网 P2P 能源交易[110]等。此外，部分文献将分布鲁棒和机会约束结合在一起，构成了一种新型的分布鲁棒机会(联合)约束(distributionally robust (joint) chance constraint, DR(J)CC)，其含义为随机变量 ξ 在最恶劣的分布下，仍然能以至少 $1-\beta$ 的概率满足约束。和常规约束相比，DR(J)CC 允许系统在优化过程中舍弃部分场景，从而提升系统的经济效益。以基于 Wasserstein 球的分布鲁棒为例[117]，转换其对应的分布鲁棒机会约束(distributionally robust chance constraint, DRCC)

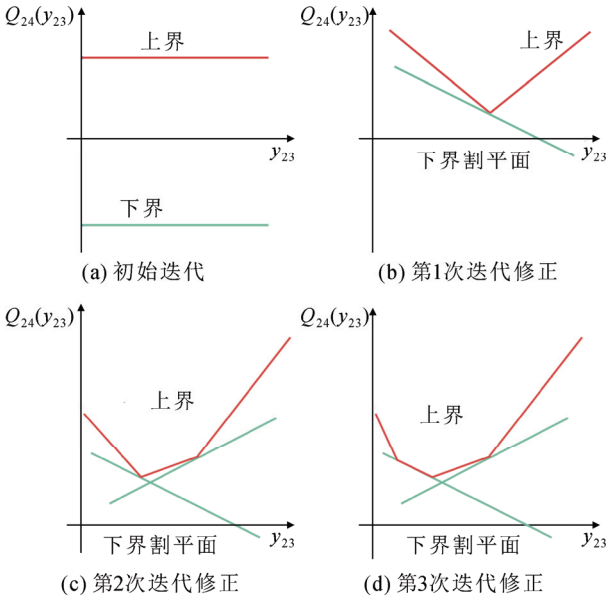


图 2　RDDP 的最劣函数 $Q_{24}(y_{23})$ 在前四次迭代的修正过程

Fig.2　Correction process of the RDDP worst function $Q_{24}(y_{23})$ in the first four iterations

的办法主要包括条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)[118]、混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)[119]以及边界支撑法[120]。CVaR 可以将 DRCC 转化为线性约束，但是存在过于保守的问题；而 MILP 有可能生成不合理的求解结果[120]，和前 2 个方法相比，边界支撑法可以避免 CVaR 转化过于保守的问题，且能有效避免 MILP 法可能生成不合理结果的情况，但转换后的约束通常含有双线性项，进而导致转化后的问题求解难度增加。

3.3　人工智能优化方法

从前文可以看出，UIES 的协同调控求解方法很大程度上依赖具有不确定性因素的数学模型，但是获取其准确的分布情况是不现实的，因此协同调控决策结果在很大程度上受限于模型准确性的限制，难以适应实际环境的变化。另一方面，UIES 中包含有大量的可控单元及其状态量时，传统的优化方法无法有效整合、利用这些数据，而人工智能技术在处理多维度、非线性问题上表现出了极强的学习能力和适用范围。

从决策框架来看，文献[121]提出了一种实时优化调度框架，首先利用深度神经网络(deep neural network, DNN)获取储能动作集，再使用 MILP 对目标函数进行求解，在提高了优化效率的同时确保满足系统约束。文献[122]提出一种基于柔性行动器-

评判器框架的深度强化学习框架，通过智能体与能源系统的交互，自适应学习控制策略。在考虑了源荷不确定性问题的同时实现了多场景下的 UIES 中多能流系统的优化调度决策。文献[123]将 UIES 的动态经济调度问题的数学表述转化为强化学习框架后利用强化学习求解了含不确定性因素的优化决策问题。文献[124]出了一种基于 DNN 和无模型强化学习(reinforcement learning, RL)技术的智能多微电网(multi-micro grid, MMG)能量管理方法。文献[125]为解决 UIES 中不同能源子系统之间的数据壁垒问题，提出了一种综合考虑居民社区实时负荷大小、能源销售与采购价格的能源系统优化管理模型，并且考虑了用能数据的加密问题。

从求解方法来看，文献[126]提出了一种用于微电网分布式经济调度的协同强化学习求解方法。利用该方法可以避免随机建模的困难和高计算复杂度。文献[127]利用基于深度强化学习的储能系统预测决策一体化调度策略求解方法，令高维度的风电场原始测量数据直接驱动储能系统。在建模方面，本文提出的方法避免了预测阶段输入信息的损失；在调度方面，利用深度强化学习求解方法优化了系统的控制策略，提升了系统动态统筹的能力。文献[128]提出了考虑系统负荷需求、可再生能源和电价不确定性的实时能源调度策略求解方法。利用深度强化学习来解决马尔可夫决策过程，即通过深度前馈神经网络来获取最优动作值函数，并使用来自加州独立系统运营商(California independent system operator，CAISO)的真实电网数据进行了算例仿真。文献[117]针对可再生能源出力和负荷需求无法建立准确的数学模型的问题，提出了一种无模型的异步优势行动者-评论家求解方法。文献[129]提出了一种基于多智能体的多主体博弈与强化学习的并网型综合能源微网协调调度模型和求解方法。针对多主体博弈这一高维决策难题，建立了以多智能体间利益均衡为目标的联合博弈决策模型并利用人工智能进行求解。

而大模型是近期产生的颠覆性、变革性技术，它将改变人工智能技术未来的发展和应用范式。大模型将具备更完备的多模态特性，在工业领域多源异构大数据的加入会使多模态更加丰富，应用更加广泛。大模型的产生为 UIES 乃至电力系统运行调控的智能化提供了前所未有的机遇。

4 仿真软件

在实际工程应用中，利用 UIES 设计和仿真软件有助于提升工作效率，下面从国内和国外两个维度来对常用的工具进行介绍。

4.1 国内

Cloud PSS-IESLab 是由清华四川能源互联网研究院开发的一款软件[130]，支持 20 余种常见的综合能源系统设备模型，帮助用户建立实际系统的数字镜像，进行系统运行状态模拟和预测，提供决策支撑和数据参考[131-132]。

华北电力大学综合能源系统仿真平台[133]主要由 4 大模块组成，分别是实现顶层设计方案的规划模块、用于协同调控的优化模块、实现分布式、微网形式下多种能源之间的多类型电力市场互动的交易模块以及对经济、环境和社会效益进行综合评价的效益评估模块。

4.2 国外

HOMER (hybrid optimization of multiple energy resources)是目前全球用于多能流微网系统调控最为广泛的软件[134]。它主要有 3 个版本，分别是：用于解决电网、微电网的运行成本最优问题的 HOMER Pro；用于降低用能成本，同时提升以电动汽车充电站为代表的用户侧单元并网灵活性和韧性的 HOMER Grid；服务于可再生能源规模化开发和储能建设的 HOMER Front。

SAM (system advisor model)是由美国新能源国家实验室开发的一款免费的桌面级应用程序[135]。它可以对集中/分布式光伏、风力发电系统、化学储能电池、潮汐发电系统等对多种可再生能源系统进行建模，并对其投资和收益进行计算。该软件提供支持和培训，并且用户社区较为活跃[136]，在 YOUTUBE 有上百个培训视频并有 6000+订阅者。

LEAP (long-range energy alternatives planning system)是一个功能强大的长期能源选择规划系统，用于综合能源规划和气候变化评估[137]。利用 LEAP 模型可以自下而上将各个行业的各个能源瓶中、各个有代表性的产品、各个行业的能源消费信息进行汇总，从而对未来全社会的能源消费、能源效率、能源结构及环境影响进行分析，并对各种能源方案进行详细的经济效益分析，通常称为终端能源消费模型。LEAP 具有灵活的模型结构和数据框架，可适用于不同尺度、不同行业部门的能源问题分析。

LEAP 及其相关培训材料和文件可免费提供给中低收入国家的合格学术、政府和非营利组织以及世界各地的学生。已被全球近 190 个国家的数千个组织采用，包括政府机构、学术界、非营利组织、咨询公司和能源公用事业公司。目前，至少有 37 个国家使用 LEAP 来协助制定 2015 年《联合国气候变化框架公约》，LEAP 正迅速成为各国(尤其是发展中国家)进行综合资源规划和温室气体缓解评估的标准。LEAP 网站在全球拥有 36 000 多名成员，除了开发和支持 LEAP，他们还开发了基于 LEAP 的情景研究，帮助决策者和规划者探索满足未来能源需求和制定低碳发展战略。

目前 UIES 设计和仿真软件正在从基于系统运行约束模型和统一能路模型向基于数据-知识融合驱动下的 UIES 模型发展。但是以上 2 种方式都有一定的不适应性，基于系统运行约束模型和统一能路模型设计和仿真软件无法满足 UIES 中海量分布式资源和柔性负荷的接入使得调控的规模和难度急剧提升的需求；基于数据-知识融合驱动的设计和仿真软件生成的结果可解释性差，并且存在未充分利用人类经验和先验知识的缺陷。因此未来 UIES 设计和仿真软件的发展方向应该是构建基于人机混合增强智能的高效智能调控应用软件，使得软件具有更强大的泛化能力和复杂场景适应能力，生成满足源网荷储协同调控、零碳低碳运行、应急调整、市场辅助的多维决策方案。

5　未来研究展望

在智慧城市建设、“新基建”、能源技术持续突破创新、能源市场化改革、智慧能源推广应用等多重市场、技术机遇驱动下，以新能源、氢能、电动汽车、能源互联网相关的芯片产业为代表的相关产业将引来快速发展，对于 UIES 的建设和推广作用巨大。但是，通过对 UIES 协同调控与互动交易相关研究的整理、归纳和总结可知，以下问题还有待研究。

1）UIES 中多能源协同运行灵活性潜力挖掘

从世界范围内来看，智慧城市发展存在多方面的探索，但就能源角度来看，基本都停留在智慧能源城市即“新能源”城市的认识层面。而未来新型电力系统建设框架下的 UIES 应该是“多能互补、源网荷储协调”的智慧能源系统。因此，UIES 的协同调控首先应以最大化利用城市内外部清洁能源为目标，尤其是在能源供应环节，需要全面、统筹考虑城市内各类能源资源的利用，以最大限度利用清洁能源。其次，构建以城市电网为核心协同调控城市内多能源系统，即以电能为核心，热、气、冷等能源系统协同优化，尤其是在负荷侧，强调电能高效替代、再电气化等理念，综合考虑各能源品类终端需求。最后，需要以提升 UIES 运行灵活裕度为目标合理配置多类型储能，提高 UIES 运行灵活性。

2）UIES 全设备模型建模方法与信息交换技术

UIES 内的元件属于不同的能源子系统，同一能源子系统内的设备属于不同的业务部门。从 UIES 建设和发展的角度出发，各个能源子系统、各个业务部门之间具有高效的互通性是基本条件。现有的为计算服务的模型无法服务于信息交互，并且模型面向的对象为从事 UIES 规划和运行优化的研究人员，对于 UIES 的运维和用户并不适用，需要从顶层设计的高度系统性设计和建立统一的语义(数据模型)、统一的语法(协议)和统一的网络概念。

UIES 的元件涵盖了分布式资源、多类型储能、电动汽车车辆及其充电桩等。以 UIES 作为物理基础的综合能源服务业务应用涉及到以上各个物理主体以及相关业务场景，且 UIES“运营-服务”场景下不同物理主体和业务场景具有不同的数据模型。此，如何充分考虑综合能源服务业务的多样性，提出基于知识驱动的智能化深度语义理解方法，实现面向配用电域“运营-服务”服务场景语义解析与信息交换，是未来需要解决的关键技术问题之一。

3）UIES 内多元用户互动特性分析

目前，UIES 已经实现了信息-物理系统的深度融合。但是在 UIES 中，能源互联网和电力物联网融合下的多元社会化用户涵盖了源荷储各环节，不同类型用户具有不同特性，因此 UIES 的相关研究不是简简单单传统电力系统电力负荷理论的延伸，有许多新的问题需要解决：如何认知新需求与旧服务矛盾下的电力用户多元特性？而传统电力用户特性分析仅关注用户的电气特性和功率特性，对应技术手段缺乏对负荷背后的用户的关注，无法应对新形势下海量用户的多元化需求。如何使能量互联转换模糊化下的用户互动具有可控性？可再生能源高渗透率分散接入 UIES 使用户的电源属性段具有强波动性和随机性，电力市场的开放使得用户更加具有主动性和自动性，如何充分利用用户的强交互性、主动性和不确定性，用新的技术手段实现用户互动

可控性，使其实现从“被动适应可再生能源并网带来的不确定性”的模式，到主动构建“强不确定性-交互性耦合”的友好互动模式的转变。

4）信息-物理-社会深度融合下的 UIES

电力系统正日益成为一个“信息-物理-社会”高度融合的复杂系统，电力用户作为社会网有机组成部分，其行为受到环境、经济、社会因素等多元因素的影响。但目前国内外研究将用户行为与其他网络的耦合性割裂，对“物理-信息-社会”深度耦合 UIES 的社会视角建模较少。需要从能源用户的角度出发，只考虑与能源有关的网络间的耦合关系，建立适合电力系统定量分析的简化模型。

从信息层面和物理层面看，UIES 具有较为明确可量化的建设规律和运行规则，然而 UIES 中，一次能源、发电、输电、用电，各环节都是由不同利益主体的主体，利益差别产生博弈空间，博弈过程的行为反映特性将是能源系统发展的下一个机遇和挑战。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 白雪洁，汪海凤，闫文凯. 资源衰退、科教支持与城市转型——基于环产出动态 SBM 模型的资源型城市转型效率研究[J]. 中国工业经济，2014(11)：30-43.
BAI Xuejie, WANG Haifeng, YAN Wenkai. Resource recession, science & technology and education support and urban transformation—research on transformation efficiency of resource-based cities based on the dynamic SBM model covering bad output[J]. China Industrial Economics, 2014(11): 30-43.

[2] 国网能源研究院有限公司. 面向消费侧低碳发展的能源规划方法[M]. 北京：中国电力出版社，2022.
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd.. Approaches to energy planning for low-carbon development on the consumer side[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2022.

[3] 阮前途. 面向省级新型电力系统的发展评价方法及目标形态研究[J]. 新型电力系统，2024，2(1)：26-35.
RUAN Qiantu. Research on development evaluation method and target forms for provincial new power system[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(1): 26-35.

[4] 戴 璟，王剑晓，张兆华，等. 新型电力系统形态特征与关键技术[J]. 新型电力系统，2023，1(2)：161-183.
DAI Jing, WANG Jianxiao, ZHANG Zhaohua, et al. Morphological characteristics and key technologies of new power system[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 161-183.

[5] 廖思阳，皮山泉，徐 箭，等. 新型电力系统直控式负荷多层级协同调控关键技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3669-3683.
LIAO Siyang, PI Shanquan, XU Jian, et al. Review of key technologies for multi-level cooperative regulation of direct-controlled loads in new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3669-3683.

[6] 王再闯，陈来军，李笑竹，等. 基于合作博弈的能源共享模式下多园区低碳优化调度[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1380-1391.
WANG Zaichuang, CHEN Laijun, LI Xiaozhu, et al. Multi-park low-carbon optimal scheduling under energy sharing mode based on cooperative game[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1380-1391.

[7] MORLET C, KEIRSTEAD J. A comparative analysis of urban energy governance in four European cities[J]. Energy Policy, 2013, 61: 852-863.

[8] YUAN X C, LYU Y J, WANG B, et al. China’s energy transition strategy at the city level: The role of renewable energy[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 205: 980-986.

[9] HOU J, LIU Y S, WU Y, et al. Comparative study of commercial building energy-efficiency retrofit policies in four pilot cities in China[J]. Energy Policy, 2016, 88: 204-215.

[10] 李苏秀，刘 林，张 宁，等. 新型电力系统产业发展展望：产业结构、要素作用、价值创造[J]. 新型电力系统，2024，2(1)：65-77.
LI Suxiu, LIU Lin, ZHANG Ning, et al. Industrial development research on the new type power system: industry structure, key factors and value creation[J]. New Type Power Systems, 2024, 2(1): 65-77.

[11] 别朝红，林超凡，李更丰，等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报，2020，40(9)：2735-2744.
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744.

[12] 张楚汉，王光谦，李铁键. 变化环境下城市暴雨致灾防御对策与建议[J]. 中国科学院院刊，2022，37(8)：1126-1131.
ZHANG Chuhan, WANG Guangqian, LI Tiejian. Prevention countermeasures and suggestions for urban rainstorm disasters under changing environment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1126-1131.

[13] 周业荣，毛玉鑫，胡 杨，等. 2022 年夏季极端天气对四川电力影响与启示[J]. 水力发电学报，2023，42(6)：23-29.
ZHOU Yerong, MAO Yuxin, HU Yang, et al. Impacts of extreme weather on Sichuan power in summer of 2022 and its enlightenment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6): 23-29.

[14] 贾宏杰，王 丹，徐宪东，等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化，2015，39(7)：198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.

[15] 刘涤尘，马恒瑞，王 波，等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化，2018，42(4)：113-120，141.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120, 141.

[16] 崔 杨，姜 涛，仲悟之，等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J]. 电网技术，2020，44(7)：2474-2482.
CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Source-load coordination economic dispatch method for regional integrated energy system considering wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2474-2482.

[17] 颜 宁，马广超，李相俊，等. 基于季节性碳交易机制的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报，2024，44(3)：918-931.
YAN Ning, MA Guangchao, LI Xiangjun, et al. Low-carbon economic dispatch of park integrated energy system based on seasonal carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 918-931.

[18] 潘　超，范宫博，王锦鹏，等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报，2023，38(6)：1633-1647.
PAN Chao, FAN Gongbo, WANG Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633-1647.

[19] 贠保记，张恩硕，张　国，等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(22)：11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a "dual carbon "mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.

[20] 张苏涵，顾　伟，姚　帅，等. 综合能源网络统一建模及其应用(一)：时域二端口模型[J]. 中国电机工程学报，2021，41(19)：6509-6520.
ZHANG Suhan, GU Wei, YAO Shuai, et al. Unified modeling of integrated energy networks in time domain and its applications (I): two-port models in time domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6509-6520.

[21] 陈瑜玮，孙宏斌，郭庆来. 综合能源系统分析的统一能路理论(五)：电-热-气耦合系统优化调度[J]. 中国电机工程学报，2020，40(24)：7928-7937.
CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (V): integrated electricity-heat-gas dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7928-7937.

[22] 陈彬彬，孙宏斌，陈瑜玮，等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一)：气路[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：436-443.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443.

[23] 陈彬彬，孙宏斌，尹冠雄，等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二)：水路与热路[J]. 中国电机工程学报，2020，40(7)：2133-2142.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142.

[24] 陈彬彬，孙宏斌，吴文传，等. 综合能源系统分析的统一能路理论(三)：稳态与动态潮流计算[J]. 中国电机工程学报，2020，40(15)：4820-4830.
CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): steady and dynamic energy flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4820-4830.

[25] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 3 版. 北京：高等教育出版社，2016.
NI Guangzheng. Principles of engineering electromagnetic fields[M]. 3rd ed. Beijing, China: High Education Press, 2016.

[26] 张苏涵，顾　伟，姚　帅，等. 综合能源网络统一建模及其应用(二)：复频域增广模型与时、频模型对比[J]. 中国电机工程学报，2022，42(16)：5798-5810.
ZHANG Suhan, GU Wei, YAO Shuai, et al. Unified modeling of integrated energy networks in time domain and its applications (II): augmented model in complex frequency domain and comparison between time/frequency domain models[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5798-5810.

[27] 王　波，王红霞，姚良忠，等. 电力系统多模态数据融合模式及关键技术问题[J]. 电力系统自动化，2022，46(19)：188-199.
WANG Bo, WANG Hongxia, YAO Liangzhong, et al. Multi-modal data fusion mode for power system and its key technical issues[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 188-199.

[28] 王红霞，王　波，董旭柱，等. 面向电力多模态融合的语义差异性和感知能力差异性分析方法[J/OL]. 高电压技术，2024：1-11 [2024-04-03]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20230490.
WANG Hongxia, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Semantic difference and performance difference analysis method for power multimodal data fusion[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-11 [2024-04-03]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230490.

[29] 陈海文，王守相，王绍敏，等. 基于门控循环单元网络与模型融合的负荷聚合体预测方法[J]. 电力系统自动化，2019，43(1)：65-74.
CHEN Haiwen, WANG Shouxiang, WANG Shaomin, et al. Aggregated load forecasting method based on gated recurrent unit networks and model fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 65-74.

[30] 陈　卓. 残差自修正深度学习集成神经网络在短期电力负荷预测中的应用[D]. 杭州：浙江大学，2018.
CHEN Zhuo. Application of residual self-correction deep-learning integrated neural network in short-term load forecasting[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2018.

[31] WANG J X, ZHONG H W, LAI X W, et al. Exploring key weather factors from analytical modeling toward improved solar power forecasting[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1417-1427.

[32] ABEDINIA O, AMJADY N, GHADIMI N. Solar energy forecasting based on hybrid neural network and improved metaheuristic algorithm[J]. Computational Intelligence, 2018, 34(1): 241-260.

[33] 王　波，王红霞，朱丹蕾，等. 基于统一潮流大数据的综合能源系统薄弱点辨识方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(7)：85-93.
WANG Bo, WANG Hongxia, ZHU Danlei, et al. Identification method for weak nodes of integrated energy system based on big data of unified power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 85-93.

[34] WANG H X, WANG B, ZHANG J X, et al. Free probability theory based event detection for power grids using iot-enabled measurements[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 1-12.

[35] 吉兴全，朱应业，张玉敏，等. 基于 DDQN-KRR 动态重构策略的综合能源系统运行优化[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3195-3204.
JI Xingquan, ZHU Yingye, ZHANG Yumin, et al. Operation optimization of integrated energy system based on DDQN-KRR dynamic reconfiguration strategy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3195-3204.

[36] 王成山，董　博，于　浩，等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报，2021，41(5)：1597-1607.
WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1607.

[37] IPCC. IPCC to release “Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability” report[EB/OL].[2023-12-11]. https://www.ipcc.ch/2007/03/21/ipcc-to-release-climate-change-2007-impacts-adaptation-and-vulnerability-report/.

[38] 邰能灵，王萧博，黄文焘，等. 港口综合能源系统低碳化技术综述[J]. 电网技术，2022，46(10)：3749-3763.
TAI Nengling, WANG Xiaobo, HUANG Wentao, et al. Review of low-carbon technology for integrated port energy systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3749-3763.

[39] 陈　静，杨坤漓，张　岩，等. 多时间尺度下计及综合需求响应和碳捕集-电转气联合运行的综合能源系统优化调度[J/OL]. 电力自动化设备，2023：1-16[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YoFA4grnCX67E9yA96dbJbSxsmWxD91hvOfS0-BTmBkQpzScMGswDmkhWU9fxjh4kg83YZREEiJy_aBaK36A8xo-Ta22KO8XSMBVJ9CKecDxSRP1haF4d2RxTtm8QSzLS1ALRKtAlt

1IM=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
CHEN Jing, YANG Kunli, ZHANG Yan, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering integrated demand response and joint operation of carbon capture and power-to-gas under multiple time scales[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2024: 1-16 [2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YoFA4grnCX67E9yA96dbJbSxsmWxD91hvOfS0BTmBkQpzScMGswDmkhWU9fxjh4kg83YZREEiJy_aBaK36A8xoTa22KO8XSMBVJ9CKecDxSRP1haF4d2RxTtm8QSzLS1ALRKtAlt1IM=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[40] 魏震波，李 杰，杨 超，等. 基于动态掺氢策略的综合能源系统低碳经济调度[J/OL]. 电网技术，2024：1-19[2024-04-03]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2180.
WEI Zhenbo, LI Jie, YANG Chao, et al. Low-carbon economic scheduling for integrated energy system based on dynamic hydrogen doping strategy[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-19[2024-04-03]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2180.

[41] 骆 钊，罗蒙顺，沈 鑫，等. 基于碳捕集-电转气的矿区综合能源系统协同优化调度[J]. 电力系统自动化，2024，48(3)：22-30.
LUO Zhao, LUO Mengshun, SHEN Xin, et al. Collaborative optimal scheduling of coal mine integrated energy system based on carbon capture and power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 22-30.

[42] 高瑞阳，王新宝，高 娴，等. 考虑氢能利用与碳捕集联合灵活运行的综合能源系统源荷低碳优化[J/OL]. 电力系统及其自动化学报，2024：1-10[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YoFA4grnCX440u6-240t0ERlbUoMquG20PPywzYw6Edef-3lY82bAVz6-Q2hhLgkkhz4EUE2oazDuRb1Q8yw3kt_eJQkAQh1_3wUjJF-cRMBVZWK6UAau1HkDtWIdMTCgStpjgS3XEQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Low carbon optimization of integrated energy systems considering flexible operation of hydrogen energy utilization and carbon capture[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024: 1-10[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=YoFA4grnCX440u6-240t0ERlbUoMquG20PPywzYw6Edef-3lY82bAVz6-Q2hhLgkkhz4EUE2oazDuRb1Q8yw3kt_eJQkAQh1_3wUjJF-cRMBVZWK6UAau1HkDtWIdMTCgStpjgS3XEQ=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[43] 彭 雄，鲍 刚，李振华，等. 考虑碳捕集与光热电站的综合能源系统优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报，2024：1-13 [2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJ&filename=DLZD20231119002.
PENG Xiong, BAO Gang, LI Zhenhua, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering carbon capture and photothermal power station[J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024: 1-13 [2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJ&filename=DLZD20231119002.

[44] 陈 芳，王 泽，尉鹏程. 碳交易背景下含 P2G-碳捕集的综合能源系统机会模糊优化调度方法研究[J]. 电气应用，2023，42(10)：62-69.
CHEN Fang, WANG Ze, WEI Pengcheng. Study on the opportunity fuzzy optimization scheduling method of integrated energy systems with P2G and carbon capture under the context of Carbon trading[J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(10): 62-69.

[45] LIU C R, WANG H Q, WANG Z Y, et al. Research on life cycle low carbon optimization method of multi-energy complementary distributed energy system: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 336: 130380.

[46] 刘鑫蕊，罗雨晴，侯 敏，等. 阶梯式碳交易的城市多能系统能量互补优化调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2275-2285.
LIU Xinrui, LUO Yuqing, HOU Min, et al. Energy complementation optimal scheduling strategy of urban multi-energy system with stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2275-2285.

[47] LI Y, LIU Z H, SANG Y F, et al. Optimization of integrated energy system for low-carbon community considering the feasibility and application limitation[J]. Applied Energy, 2023, 348: 121528.

[48] GUO J C, WU D, WANG Y Y, et al. Co-optimization method research and comprehensive benefits analysis of regional integrated energy system[J]. Applied Energy, 2023, 340: 121034.

[49] 熊 展，王 素，王玲玲，等. 考虑多能互补灵活性和用户低碳意愿的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J/OL]. 电网技术，2024：1-14 [2024-04-03]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2028.
XIONG Zhan, WANG Su, WANG Lingling, et al. Robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering multi-energy flexibility complementary and users' low-carbon willingness[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-14 [2024-04-03]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2028.

[50] 杨志豪，苗世洪，涂青宇，等. 考虑多品位能源互补的综合能源系统分级规划策略[J/OL]. 高电压技术，2024：1-17[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJ&filename=GDYJ20230331001.
YANG Zhihao, MIAO Shihong, TU Qingyu, et al. A hierarchical planning strategy for integrated energy system considering the complementation of multi-grade energy[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-17[2024-04-03]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJ&filename=GDYJ20230331001.

[51] 李宏仲，房宇娇，肖宝辉. 考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J]. 电网技术，2019，43(9)：3130-3138.
LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3130-3138.

[52] FAN C X, ZHAO W Q, XU J W, et al. Multi-time scale low-carbon optimization of IES considering demand response of multi-energy[C]//2022 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science. Dalian, China: IEEE, 2022: 793-799.

[53] ZHU X, SUN Y Z, YANG J, et al. Day-ahead energy pricing and management method for regional integrated energy systems considering multi-energy demand responses[J]. Energy, 2022, 251: 123914.

[54] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[55] STANKOVIĆ A M, TOMSOVIC K L, DE CARO F, et al. Methods for analysis and quantification of power system resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4774-4787.

[56] LIU J, JIAN L R, WANG W T, et al. The role of energy storage systems in resilience enhancement of health care centers with critical loads[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102086.

[57] NGUYEN H T, MUHS J, PARVANIA M. Preparatory operation of automated distribution systems for resilience enhancement of critical loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2354-2362.

[58] TAHERI B, SAFDARIAN A, MOEINI-AGHTAIE M, et al. Distribution system resilience enhancement via mobile emergency generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(4): 2308-2319.

[59] ZHANG G, ZHANG F, ZHANG X, et al. Sequential disaster recovery model for distribution systems with co-optimization of maintenance and restoration crew dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4700-4713.

[60] MEHRJERDI H, MAHDAVI S, HEMMATI R. Resilience maximization through mobile battery storage and diesel DG in integrated electrical and heating networks[J]. Energy, 2021, 237: 121195.

[61] LIU J H, CAO X Y, XU Z B, et al. Resilient operation of multi-energy industrial park based on integrated hydrogen-electricity-heat microgrids[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(57): 28855-28869.

[62] HOSSEINI S E, AHMARINEJAD A. Stochastic framework for day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks considering multiple downward energy hubs[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102066.

[63] HOSSEINI S E, AHMARINEJAD A, TABRIZIAN M, et al. Resilience enhancement of integrated electricity-gas-heating networks through automatic switching in the presence of energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 47: 103662.

[64] HEMMATI R, MEHRJERDI H, NOSRATABADI S M. Resilience-oriented adaptable microgrid formation in integrated electricity-gas system with deployment of multiple energy hubs[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 71: 102946.

[65] CHEN W D, WANG J N, YU G Y, et al. Research on day-ahead transactions between multi-microgrid based on cooperative game model[J]. Applied Energy, 2022, 316: 119106.

[66] NASIRI N, ZEYNALI S, RAVADANEGH S N, et al. Moment-based distributionally robust peer-to-peer transactive energy trading framework between networked microgrids, smart parking lots and electricity distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1965-1977.

[67] 晏鸣宇，王玲玲，滕　飞，等. 面向分布式能源的可交易能源市场研究综述与展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(18)：33-48.
YAN Mingyu, WANG Lingling, TENG Fei, et al. Review and prospect of transactive energy market for distributed energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 33-48.

[68] 林　俐，许冰倩，王皓怀. 典型分布式发电市场化交易机制分析与建议[J]. 电力系统自动化，2019，43(4)：1-8.
LIN Li, XU Bingqian, WANG Haohuai. Analysis and recommendations of typical market-based distributed generation trading mechanisms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 1-8.

[69] ISLAM M, YANG F W, AMIN M. Control and optimisation of networked microgrids: a review[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(6): 1133-1148.

[70] WU Z, XU Z, GU W, et al. Decentralized game-based robustly planning scheme for distribution network and microgrids considering bilateral energy trading[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 803-817.

[71] MOHSENI S, PISHVAEE M S. Energy trading and scheduling in networked microgrids using fuzzy bargaining game theory and distributionally robust optimization[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121748.

[72] WANG Z, HOU H, ZHAO B, et al. Risk-averse stochastic capacity planning and P2P trading collaborative optimization for multi-energy microgrids considering carbon emission limitations: an asymmetric Nash bargaining approach[J]. Applied Energy, 2024, 357: 122505.

[73] 胡亚春，窦震海，张志一，等. 基于分布鲁棒和改进纳什谈判的多微网-共享储能运行优化策略[J/OL]. 电力建设，2024：1-24 [2024-04-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.TM.20231227.1729.014. html.
HU Yachun, DOU Zhenhai, ZHANG Zhiyi, et al. Multi-microgrid and shared energy storage operation optimization strategy based on distributionally robust and improved Nash bargaining[J/OL]. Electric Power Construction, 2024: 1-24[2024-04-03]. http://kns.cnki. net/kcms/detail/11.2583.TM.20231227.1729.014. html.

[74] WANG L L, ZHOU Q, XIONG Z, et al. Security constrained decentralized peer-to-peer transactive energy trading in distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 188-197.

[75] PU Y C, LI Q, LUO S Y, et al. Peer-to-peer electricity-hydrogen trading among integrated energy systems considering hydrogen delivery and transportation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3895-3911.

[76] NASH JR J F. The bargaining problem[J]. Econometrica, 1950, 18(2): 155-162.

[77] 马腾飞，裴　玮，肖　浩，等. 基于纳什谈判理论的风-光-氢多主体能源系统合作运行方法[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：25-39.
MA Tengfei, PEI Wei, XIAO Hao, et al. Cooperative operation method for wind-solar-hydrogen multi-agent energy system based on nash bargaining theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 25-39.

[78] 吴锦领，楼　平，管敏渊，等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J]. 电网技术，2022，46(7)：2711-2721.
WU Jinling, LOU Ping, GUAN Minyuan, et al. Operation optimization strategy of multi-microgrids energy sharing based on asymmetric nash bargaining[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2711-2721.

[79] ZHANG T H, CHEN C M, MA L Y, et al. Multi-step clustering and generalized nash bargaining-based planning strategy of community-shared energy storage for large-scale prosumers[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1013-1027.

[80] GAO J, SHAO Z G, CHEN F X, et al. Distributed robust operation strategy of multi-microgrid based on peer-to-peer mult-energy trading[J]. IET Energy Systems Integration, 2023, 5(4): 376-392.

[81] CHEN C M, ZHU Y Q, ZHANG T H, et al. Two-stage multiple cooperative games-based joint planning for shared energy storage provider and local integrated energy systems[J]. Energy, 2023, 284: 129114.

[82] YAN D X, CHEN Y. Distributed coordination of charging stations with shared energy storage in a distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4666-4682.

[83] WANG L L, JIANG C W, GONG K, et al. Data-driven distributionally robust economic dispatch for distribution network with multiple microgrids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(24): 5712-5719.

[84] 崔世常. 基于博弈论的产消者微电网能量分享策略研究[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
CUI Shichang. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in engineering[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[85] 何炳生. 我和乘子交替方向法 20 年[J]. 运筹学学报，2018，22(1)：1-31.
HE Bingsheng. My 20 years research on alternating directions method of multipliers[J]. Operations Research Transactions, 2018, 22(1): 1-31.

[86] 朱瑞金，吴　军，崔世庭. 一种基于双层纳什博弈的微电网双层电能交易策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2023，35(12)：100-109.
ZHU Ruijin, WU Jun, CUI Shiting. Two-layer power trading strategy for microgrid based on two-layer nash game[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(12): 100-109.

[87] ZHANG Z N, FEDOROVICH K S. Optimal operation of multi-integrated energy system based on multi-level Nash multi-stage robust[J]. Applied Energy, 2024, 358: 122557.

[88] ZHANG J, CHE L, WAN X, et al. Distributed hierarchical coordination of networked charging stations based on peer-to-peer trading and EV charging flexibility quantification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2961-2975.

[89] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBIČ G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5163-5173.

[90] XU S, ZHAO Y, LI Y Z, et al. An iterative uniform-price auction mechanism for peer-to-peer energy trading in a community microgrid[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117088.

[91] MI Y, TAO B, FU Y, et al. A game bidding model of electricity and hydrogen sharing system considering uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024: 1-11.

[92] 章攀钊，谢丽蓉，马瑞真，等. 考虑电动汽车集群可调度能力的多主体两阶段低碳优化运行策略[J]. 电网技术，2022，46(12)：4809-4821.
ZHANG Panzhao, XIE Lirong, MA Ruizhen, et al. Multi-player two-stage low carbon optimal operation strategy considering electric vehicle cluster schedulability[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4809-4821.

[93] ZOU Y Y, XU Y, FENG X, et al. Peer-to-peer transactive energy trading of a reconfigurable multi-energy network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(3): 2236-2249.

[94] VERA E G, CAÑIZARES C A, PIRNIA M, et al. Two-stage stochastic optimization model for multi-microgrid planning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 1723-1735.

[95] JIANG Y B, WAN C, CHEN C, et al. A hybrid stochastic-interval operation strategy for multi-energy microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 440-456.

[96] BERTSIMAS D, LITVINOV E, SUN X A, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 52-63.

[97] ZENG B. Solving two-stage robust optimization problems by a constraint-and-column generation method[R]. Tampa, USA: University of South Florida, 2011.

[98] LI G G, LI Q Q, YANG X, et al. General Nash bargaining based direct P2P energy trading among prosumers under multiple uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143: 108403.

[99] 施云辉. 考虑可再生能源不确定性的电力系统多阶段鲁棒调度方法[D]. 杭州：浙江大学，2021.
SHI Yunhui. Multi-stage robust dispatch of power system considering uncertainties of renewable energy[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2021.

[100] QIU H F, WANG L, GU W, et al. Multistage scheduling of regional power grids against sequential outage and power uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4624-4637.

[101] QIU H F, SUN Q R, LU X, et al. Optimality-feasibility-aware multistage unit commitment considering nonanticipative realization of uncertainty[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120062.

[102] QIU H F, GU W, SHENG W X, et al. Resilience-oriented multistage scheduling for power grids considering nonanticipativity under tropical cyclones[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3254-3267.

[103] LU S, GU W, XU Y J, et al. Unlock the thermal flexibility in integrated energy systems: a robust nodal pricing approach for thermal loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2734-2746.

[104] LI H, WU Q W, YANG L, et al. Distributionally robust negative-emission optimal energy scheduling for off-grid integrated electricity-heat microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 803-818.

[105] ZHONG J J, LI Y, WU Y, et al. Optimal operation of energy hub: an integrated model combined distributionally robust optimization method with stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1835-1848.

[106] LIN Z J, WU Q W, CHEN H Y, et al. Scenarios-oriented distributionally robust optimization for energy and reserve scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2943-2946.

[107] ZHENG X D, CHEN H Y. Data-driven distributionally robust unit commitment with Wasserstein metric: tractable formulation and efficient solution method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4940-4943.

[108] NGUYEN H T, CHOI D H. Distributionally robust model predictive control for smart electric vehicle charging station with V2G/V2V capability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4621-4633.

[109] 葛少云，杜咏梅，郭 玥，等. 基于分布鲁棒优化的车-站-网日前能量管理与交易[J]. 电力系统自动化，2024，48(5)：11-20.
GE Shaoyun, DU Yongmei, GUO Yue, et al. Day-ahead energy management and trading of electric vehicles, charging stations and distribution networks based on distributionally robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 11-20.

[110] LI J Y, KHODAYAR M E, WANG J H, et al. Data-driven distributionally robust co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5172-5184.

[111] 潘 华，姚 正，林顺富，等. 基于信息间隙决策理论的含光热电站及热泵的综合能源系统低碳调度优化[J]. 现代电力，2022，39(2)：169-181.
PAN Hua, YAO Zheng, LIN Shunfu, et al. Low-carbon dispatch optimization of integrated energy system including solar power plant and heat pump based on information gap decision theory[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(2): 169-181.

[112] 林舜江，冯祥勇，梁炜焜，等. 新能源电力系统不确定优化调度方法研究现状及展望[J/OL]. 电力系统自动化，2024：1-22 [2024-04-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231127.1458.002. html.
LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, LIANG Weikun, et al. Research and prospect of the uncertain optimal dispatch methods for renewable energy power systems[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2024: 1-22[2024-04-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231127.1458.002. html.

[113] 丁 涛，郭庆来，柏 瑞，等. 考虑风电不确定性的区间经济调度模型及空间分支定界法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(22)：3707-3714.
DING Tao, GUO Qinglai, BO Rui, et al. Interval economic dispatch model with uncertain wind power injection and spatial branch and bound method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3707-3714.

[114] ZHAO Long, ZENG Bo. An exact algorithm for two-stage robust optimization with mixed integer recourse problems[R]. Tampa, USA: University of South Florida, 2012.

[115] GEORGHIOU A, TSOUKALAS A, WIESEMANN W. Robust dual dynamic programming[J]. Operations Research, 2019, 67(3): 813-830.

[116] ESFAHANI P M, KUHN D. Data-driven distributionally robust optimization using the Wasserstein metric: performance guarantees and tractable reformulations[J]. Mathematical Programming, 2018, 171(1/2): 115-166.

[117] HUA H C, QIN Y C, HAO C T, et al. Optimal energy management strategies for energy Internet via deep reinforcement learning approach[J]. Applied Energy, 2019, 239: 598-609.

[118] WEN Y L, HU Z C, CHEN X L, et al. Centralized distributionally robust chance-constrained dispatch of integrated transmission-distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 2947-2959.

[119] XIE W J. On distributionally robust chance constrained programs with Wasserstein distance[J]. Mathematical Programming, 2021, 186(1/2): 115-155.

[120] ARRIGO A, ORDOUDIS C, KAZEMPOUR J, et al. Wasserstein distributionally robust chance-constrained optimization for energy and

reserve dispatch: An exact and physically-bounded formulation[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 296(1): 304-322.

[121] GAO S H, XIANG C, YU M, et al. Online optimal power scheduling of a microgrid via imitation learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 13(2): 861-876.

[122] 乔　骥，王新迎，张　擎，等. 基于柔性行动器–评判器深度强化学习的电-气综合能源系统优化调度[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：819-832.
QIAO Ji, WANG Xinying, ZHANG Qing, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-gas system with soft actor-critic deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 819-832.

[123] 杨　挺，赵黎媛，刘亚闯，等. 基于深度强化学习的综合能源系统动态经济调度[J]. 电力系统自动化，2021，45(5)：39-47.
YANG Ting, ZHAO Liyuan, LIU Yachuang, et al. Dynamic economic dispatch for integrated energy system based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 39-47.

[124] DU Y, LI F X. Intelligent multi-microgrid energy management based on deep neural network and model-free reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1066-1076.

[125] 陈明昊，孙　毅，胡亚杰，等. 基于纵向联邦强化学习的居民社区综合能源系统协同训练与优化管理方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(15)：5535-5549.
CHEN Minghao, SUN Yi, HU Yajie, et al. The collaborative training and management-optimized method for residential integrated energy system based on vertical federated reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5535-5549.

[126] LIU W R, ZHUANG P, LIANG H, et al. Distributed economic dispatch in microgrids based on cooperative reinforcement learning[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2018, 29(6): 2192-2203.

[127] 于一潇，杨佳峻，杨　明，等. 基于深度强化学习的风电场储能系统预测决策一体化调度[J]. 电力系统自动化，2021，45(1)：132-140.
YU Yixiao, YANG Jiajun, YANG Ming, et al. Prediction and decision integrated scheduling of energy storage system in wind farm based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 132-140.

[128] JI Y, WANG J H, XU J C, et al. Real-time energy management of a microgrid using deep reinforcement learning[J]. Energies, 2019, 12(12): 2291.

[129] 刘　洪，李吉峰，葛少云，等. 基于多主体博弈与强化学习的并网型综合能源微网协调调度[J]. 电力系统自动化，2019，43(1)：40-48.
LIU Hong, LI Jifeng, GE Shaoyun, et al. Coordinated scheduling of grid connected integrated energy microgrid based on multi-agent game and reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 40-48.

[130] 清鸾科技有限公司. cloudPSS[EB/OL]. (2024-01-30)[2024-02-22]. https://cloudpss. net/coretech/.
Qingluan Technology (Chengdu) Co., Ltd.. cloudPSS[EB/OL]. (2024-01-30)[2024-02-22]. https://cloudpss. net/coretech/.

[131] WU N, CHEN W D, FENG Y B, et al. Multistage heat-storage scheduling for integrated energy system using CloudPSS-IESLab[C]//2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Chengdu, China: IEEE, 2020: 512-516.

[132] TANG X Y, BAI H, ZHANG Y, et al. Simulation and analysis of integrated energy conversion and storage systems using CloudPSS-IESLab[J]. Energy Reports, 2022, 8(Supplement 1): 1372-1382.

[133] 华北电力大学能源互联网研究中心. 开展综合能源系统仿真平台与示范工程建设　推动 3060 双碳目标实现[EB/OL]. (2024-01-30)[2024-02-22]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIyMTEwODQwMg==&mid=2649910874&idx=1&sn=ca74b179b2a7847fbe15558c30676398&chksm=8fc70f87b8b0869135ab58b431eac06b6fdcd052f013f2f0a611f72c1d152aebdbea989ca717&scene=27.
Energy Internet Research Center，North China Electric Power University. Developing integrated energy system simulation platforms and demonstration projects to promote the realization of the 3060 dual-carbon target.[EB/OL]. (2024-01-30)[2024-02-22]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIyMTEwODQwMg==&mid=2649910874&idx=1&sn=ca74b179b2a7847fbe15558c30676398&chksm=8fc70f87b8b0869135ab58b431eac06b6fdcd052f013f2f0a611f72c1d152aebdbea989ca717&scene=27.

[134] HOMER. Homer software[EB/OL]. (2024-02-29)[2024-02-22]. https://homerenergy. com/.

[135] NREL. System advisor model (SAM)[EB/OL]. (2024-02-29)[2024-02-22]. https://sam.nrel.gov/.

[136] NREL. System advisor model[EB/OL]. (2024-02-05)[2024-02-22]. https://www.youtube. com/user/SAMDemoVideos.

[137] SEI. LEAP[EB/OL]. (2022-12-29)[2024-02-22]. https://www.sei.org/tools/leap-long-range-energy-alternatives-planning-system/.



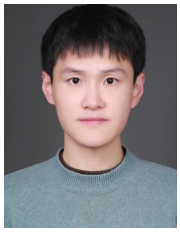
马恒瑞
1987—，男，博士，副教授
主要从事综合能源系统运行优化、配电网数字化方面的研究
E-mail: mahengrui@qhu.edu.cn

MA Hengrui
Ph.D.
Associate professor



王　波(通信作者)
1978—，男，博士，教授，博导
主要从事电力深度视觉、边缘计算和电力大数据方面的研究
E-mail: whwdwb@whu.edu.cn

WANG Bo
Ph.D., Professor
Corresponding author



王　蔚
1995—，男，博士生
主要从事能源系统不确定性优化方面的研究
E-mail: d77mvp@whu.edu.cn

WANG Wei
Ph.D. candidate

收稿日期　2024-02-26　修回日期　2024-04-07　　编辑　程子丰

附录 A

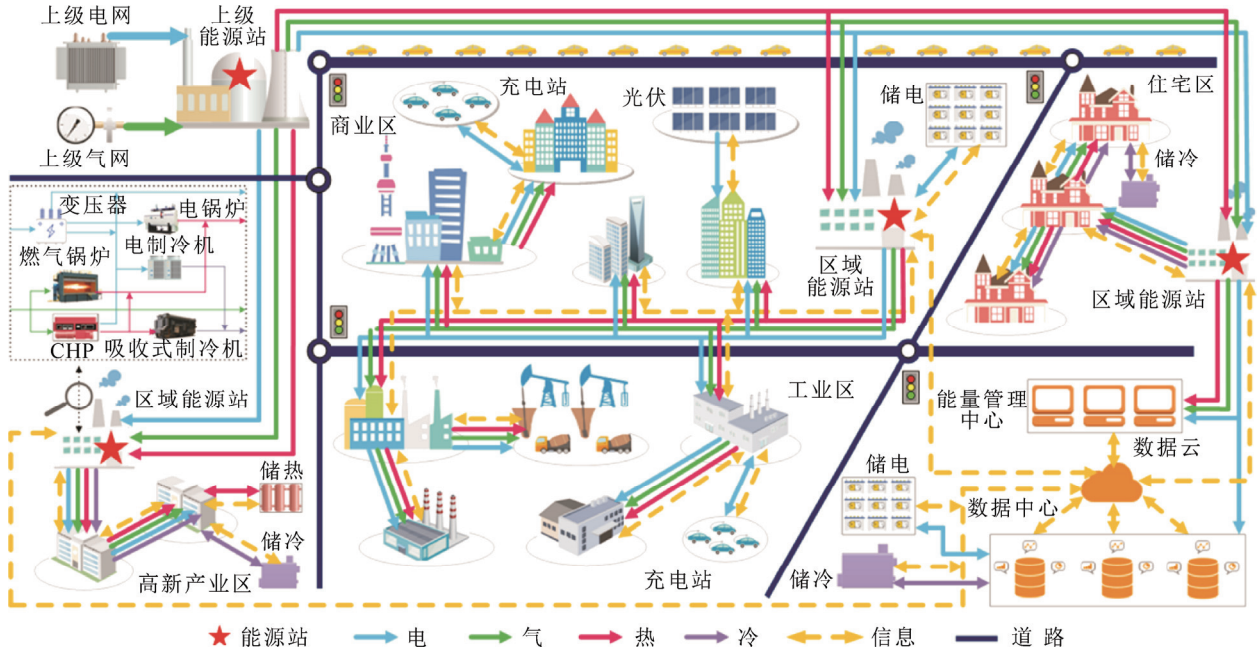


图 A1　UIES 协同调控与互动交易的研究成果分布

Fig.A1　Distribution of research results on collaborative regulation and interactive trading

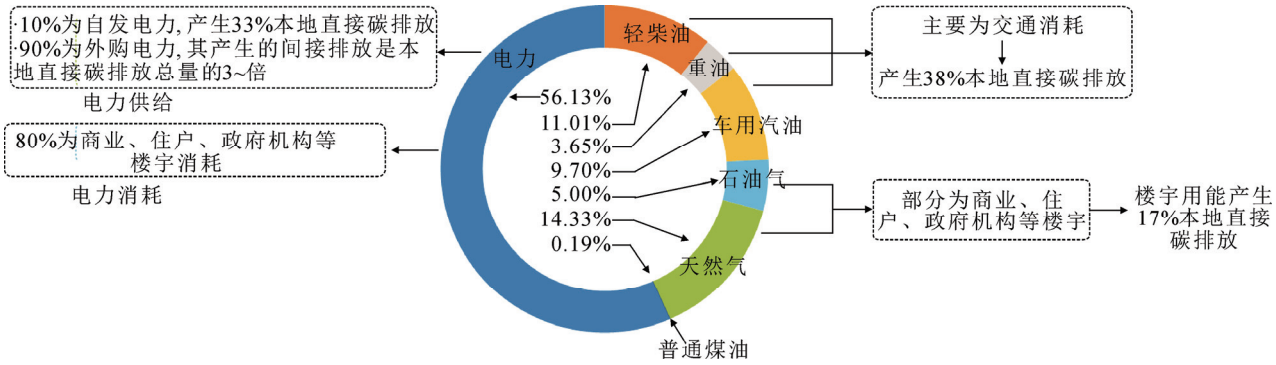


图 A2　某城市的能耗结构及其主要碳排放来源

Fig.A2　The energy consumption structure and main sources of carbon emissions in a certain city