第 49 卷 第 6 期：2219-2238 高电压技术 Vol.49, No.6: 2219-2238
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230414

面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术

葛磊蛟[1]，范延赫[1]，来金钢[2]，孙永辉[3]，张彦涛[4]
（1. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；2. 华中科技大学人工智能与自动化学院，武汉 430074；3. 河海大学能源与电气学院，南京 210098；4. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100092）

摘　要：安全稳定高效、能量流动灵活、经济效益与环境效益兼顾等是微电网低碳经济运行的基础，然而随着多类型分布式电源、多利益主体的柔性负荷等接入微电网，以及“云计算–大数据–物联网–移动互联网–人工智能”技术广泛应用，微电网的组网模式、运行方式等正发生较大的改变。为此，梳理并归纳总结人工智能赋能微电网优化运行关键技术与挑战。首先，介绍微电网物理架构并总结智能化发展趋势，梳理微电网在低碳经济目标下的特点和优化运行所面临的挑战。其次，从决策变量、优化目标、约束条件和求解方法 4 个方面阐述人工智能赋能微电网优化运行原理。再次，聚焦于可再生能源出力预测技术、微电网优化调度技术、碳交易机制、人工智能深度融合下不确定调控技术等典型应用场景，分析并总结人工智能赋能微电网优化运行的应用效果。最后，总结分析了人工智能赋能微电网优化运行的未来发展方向，为绿色微电网技术发展提供借鉴。
关键词：微电网；人工智能；低碳；经济优化运行；能量交易；能量调度

Artificial Intelligence Enabled Microgrid Optimization Technology for Low Carbon Economy

GE Leijiao[1], FAN Yanhe[1], LAI Jingang[2], SUN Yonghui[3], ZHANG Yantao[4]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100092, China)

Abstract: Safety, stability and efficiency, flexible energy flow, and economic and environmental benefits are the basis of a microgrid's low-carbon economic operation, however, with access to multiple types of distributed power sources and flexible loads of multiple interests to the microgrid, the technology of "cloud computing+big data+internet of things+mobile internet+artificial intelligence" is extensively applied, and the network mode and operation of a microgrid are changing. To this end, the key technologies and challenges of AI-enabled microgrid operation are summarized and summarized. Firstly, we introduce the physical architecture of microgrids and summarize the development trend of intelligence, and then we discuss the characteristics of microgrids and the challenges of optimized operation under the goal of a low carbon economy. Secondly, the principles of AI-enabled smart microgrid optimization are explained in terms of decision variables, optimization objectives, constraints, and solution methods. Then, the application effects of AI-enabled microgrid optimization are analyzed and summarized by focusing on typical application scenarios such as renewable energy power forecasting technology, microgrid optimization scheduling technology, carbon trading mechanism and uncertain regulation technology under the deep integration of AI. Finally, the future development direction of AI-enabled microgrid optimization operation is summarized and analyzed to provide a reference for the development of green microgrid technology.
Key words: smart microgrid; artificial intelligence; low carbon; economic optimization operation; energy trading; energy dispatch

0　引言

“绿色环保、节能降碳”的能源可持续发展路线已成为全世界的共识，提高能源利用效率、保障能源安全、提升可再生能源消纳水平以及促进环境保护已成为世界各国能源可持续发展的重要课题。其中，低碳经济运行的微电网技术是我国落实“2030 年实现碳峰值，2060 年实现碳中和”[1]的重要技术之一。

基金资助项目：科技创新 2030“新一代人工智能”重大项目(2022ZD0116900)；国家自然科学基金(52277118)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022ZD0116900), National Natural Science Foundation of China (52277118).

微电网基于源–荷–网–储多端设备聚合[2]，数字化运维、信息通信技术、市场机制辅助服务等手段，可实现一定范围内的自控、自给、自洽，能有效促进高比例可再生能源入网，提升能源供应可靠性、安全性和弹性[3]。尤其是，微电网通过新能源接入技术、电力电子技术、储能技术、物联网技术、智能通信与控制技术、云计算和大数据技术等，可实现安全高效、绿色环保运行[4]，并应用人工智能方法达成分布式能源、储能设备、负荷终端之间的优化运行以及大电网能量交互[5-6]。

但随着微电网的智能化发展，分布式能源技术突破[7]、能源信息深度融合[8]以及智能终端用能多样化[9]，能源生产、分配以及消费都发生显著变化。因此，如何通过“云大物移”、多能互补、源网荷储协同、市场互动机制等多种技术耦合发展，实现数字化、信息化、智能化等多特征强交叉的微电网向经济效益更优、环保效果更显著的绿色清洁方向转变，已成为我国电力能源战略实施的关键支撑技术之一。国内外学者也开始积极关注微电网低碳经济优化运行。文献[10]在微电网中引入电转气和朗肯循环实现电–气、热–电耦合，并构建广义集成需求响应模型，进一步采用数据驱动建模，降低微电网运行成本和碳排放量。文献[11]在多能微电网中考虑综合需求响应，通过调整冷热电负荷以降低运行成本，采用阶梯式碳交易机制严格限制微网碳排放。文献[12]计及阶梯式碳交易和分时电价对微电网进行优化配置，得到经济效益更好的配置方案。文献[13]利用不同时间尺度的储能方式稳定源荷的季节不平衡性，并采用全生命周期评估分析微电网中不同能源链的碳排放量，建立考虑碳交易的优化模型，兼顾环保性和经济性。文献[14]利用液化天然气冷能储存与碳捕集，提升系统电循环效率，达到降低碳排放的效果。

但是，微电网依然面临着新的挑战，主要包括：(1)大量不确定性分布式能源接入导致输入数据准确性低；(2)用户负荷多元化、智能终端参与源荷互动以及设备类型增多导致数据量剧增；(3)碳交易、绿证交易以及用能权交易等市场体制融合能量交易在定价机制和公平分配策略方面，仍有灰色模糊情况。在以上情景下，当前的研究尽管对微电网优化技术进行拆解分析，但仍局限于源网荷储某一侧或某方面技术，抑或将某几种技术结合，以达到具体应用场景下的局部最优方案，缺乏对微电网在人工智能技术下应用的深入阐释以及微电网优化运行过程中的关键技术系统性总结归纳。

为此，本文首先阐述微电网物理架构以及人工智能赋能下的微电网发展趋势，进一步面向低碳经济目标分析微电网特点及优化运行挑战。其次，从决策变量、优化目标、约束条件和求解方法 4 个方面简述人工智能赋能智能微电网优化运行原理，着重分析人工智能技术赋予数学规划与启发式算法的优势。再次，回顾并总结低碳经济为导向的可再生能源出力预测、多源异构组件协调运行、能量管理系统(energy management system, EMS)优化、多微电网能量交易以及微电网碳交易机制等优化运行关键技术，并基于现有人工智能技术初步提出微电网不确定性条件下的调控技术。最后，从微电网稳定性、微电网 EMS 建模、能源交易技术发展、碳交易机制完善、人工智能技术改良等方向展开科学展望，以期为微电网向绿色、开放、经济、共享发展提供技术支撑。

1 低碳经济运行的人工智能赋能微电网

1.1 人工智能赋能微电网

1.1.1 微电网物理架构

通过集成数据采集、运维、巡检等一站式服务，微电网形成以电力电子技术、通信技术、计算机技术为核心的小型发输配用电系统。其基础物理架构包括能量生产系统、能量分配系统、能量储存系统和能量终端用户，如图 1 所示。电能、热能、冷能、天然气等多能流在微电网各组件流动，通过耦合元件完成能量形态转换，实现不同子系统之间的耦合。

1.1.2 微电网智能化发展

微电网结合先进的信息技术实现对微电网的控制，利用量测与传感技术、态势感知技术获得微电网运行海量数据对微电网进行监测，获得实时数据并优化运行方式[15]；利用数据驱动和知识驱动等人工智能方法得到最优运行策略，提升微电网的能量使用效率，降低运营成本。智能微电网层次架构如图 2 所示，主要包括以下 4 个方面：

(1) 物理层。物联网技术应用，智能楼宇、智能家居、智能变压器、数据传输设备等智能设备并网促进微电网智能化。采集各种开关量、遥测信息的时间尺度精细化，引起数据量爆炸，对数据处理技术提出更高要求。用户电网互动加强，可以根据智能电表提供的数据购买和使用电能，或进行定时

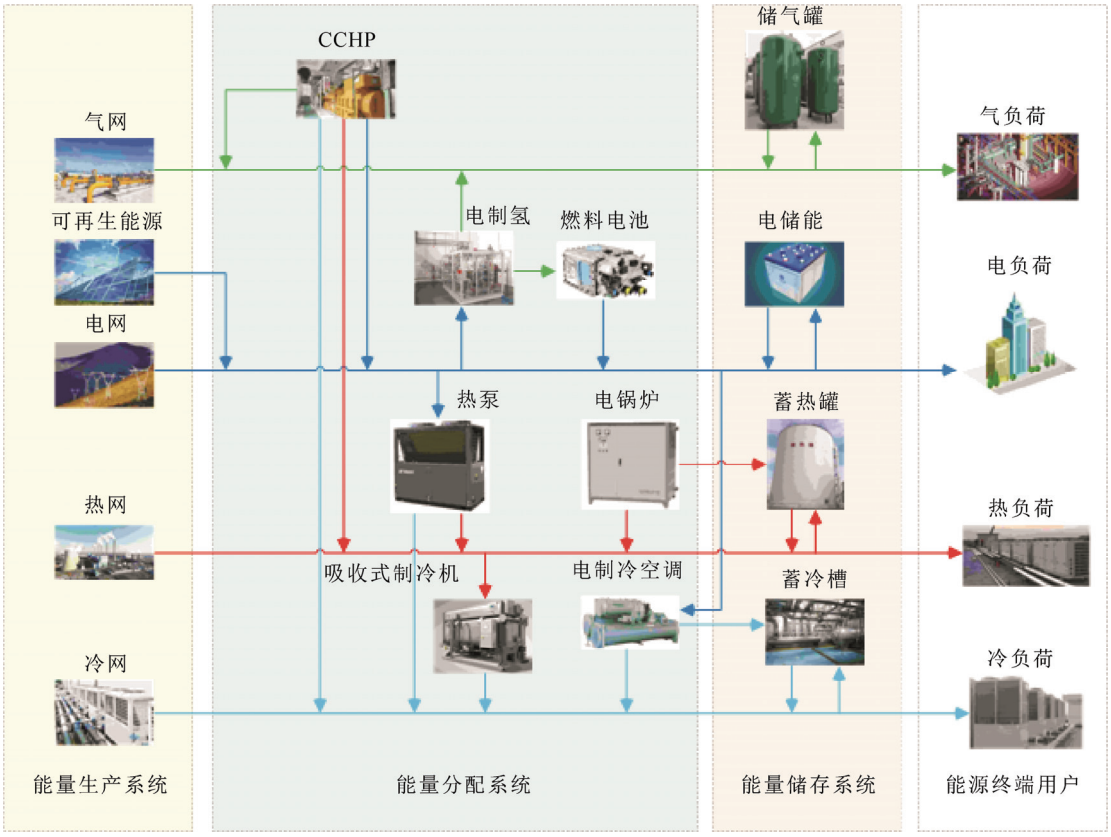


图 1　微电网物理架构

Fig.1　Physical architecture of microgrid

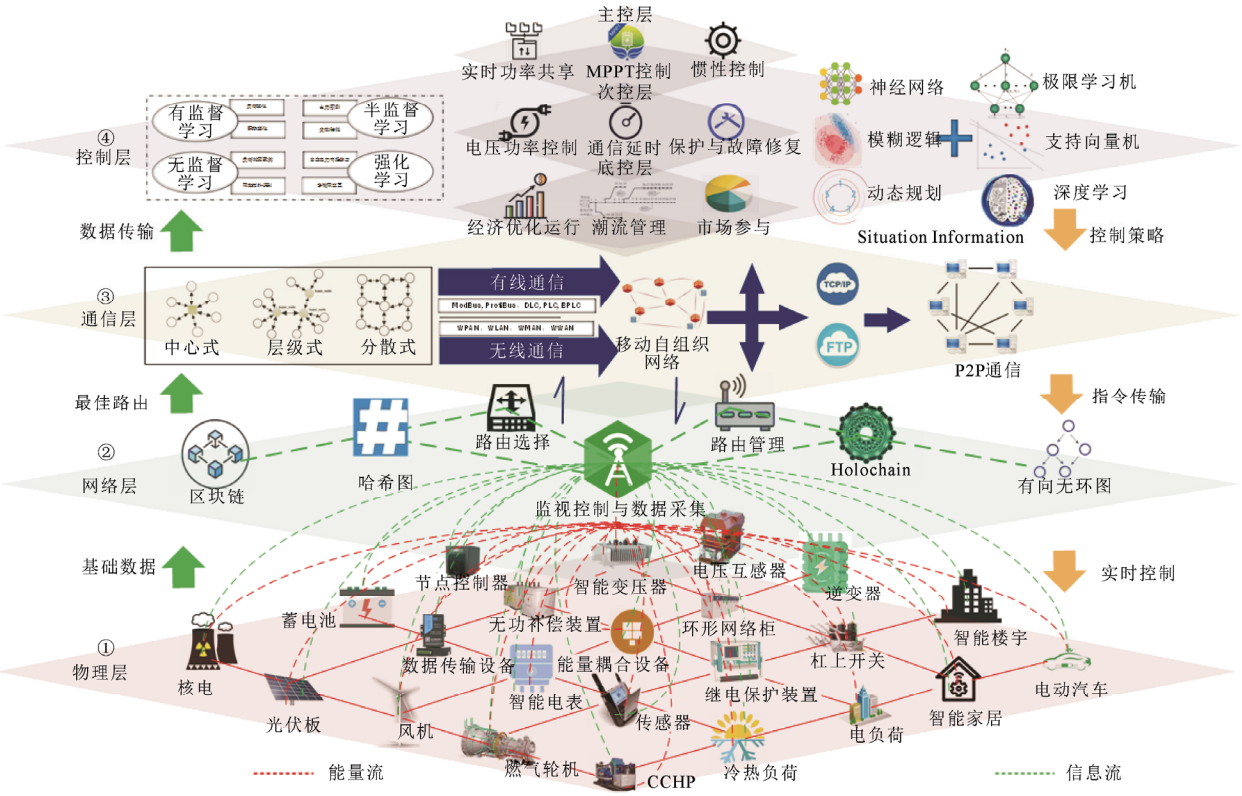


图 2　智能微电网层次架构

Fig.2　Hierarchical architecture of smart microgrid

操作和远程控制[16-17]。

(2) 网络层。基于区块链、哈希图等网络技术支撑监视控制与数据采集系统对物理层设备的运行状态进行采集与监控，提升数据可靠性[18]，同时分析微电网中设备类型、历史状态和运行参数之间的相关性[19]。网络层起到生成数据透明传输路径、为通信层提供路由选择、避免数据延迟和死锁等作用，并为数据下一步通信传输做准备。

(3) 通信层。在微电网通信层，通信架构趋向分散式结构，通过有线和无线通信传输数据，通信网络向移动自组织网络发展，辅以通信协议最终实现 P2P 通信，可以减少不同节点间通信线路的通信延时以及分布式控制器的控制延时，通信层将数据进一步传输至控制层。

(4) 控制层。控制层又可分成主控层、次控层和低控层，得到通信层的数据并生成控制指令，逐层传递控制各组件有序运行。有监督学习主要监控负荷变化和瞬态变化，半监督学习用于源荷预测以及储能容量规划，无监督学习用于负荷轮廓聚类和网络拓扑识别，强化学习用于电力市场参与和多微网交互。

1.2 面向低碳经济的微电网

为满足“碳达峰、碳中和”目标对电力行业的要求，作为新型电力系统重要组成之一的微电网，在低碳经济驱动下，资源要素、电网形态、技术业务都将发生变化[20]，为实现电力行业可持续发展奠定基础。

1.2.1 面向低碳经济的微电网特征

双碳目标下，低碳和经济已成为衡量微电网的重要指标，其特征如图 3 所示。

(1) 清洁化。在供能侧，低能耗、清洁的供电单元优先接入电网，鼓励微电网能源供应商采取节能和清洁技术[21]。同时，微电网与电力市场、碳交易市场深度融合，可根据市场的招标政策、价格风险等实时信息减少碳排放和资源浪费[22]。

(2) 故障损失小。自动控制系统、能源管理系统、负荷管理系统的完善使得微电网性能大大提高，通过自我修复，凸显自愈能力[23]。从经济角度看，故障发生时，可以准确发现并快速抢修维护，降低了维护成本和瘫痪风险。同时，微电网故障降低可以减少供应商、运营商、用户等多方损失。

(3) 负荷类型多元化。包括敏感型、非可控型、可控型等[24]，冷、热、电、气负荷对能量供应的时效性和品质提出更高要求，新型负荷与供能侧呈现源荷互动的特点。同时微电网源荷之间的双向交互机制使得微电网运行更加灵活，在此条件下，源荷数据精确匹配同样不可忽视，并在此背景下衍生出的微电网的态势感知和数据采集技术随之发展[25]。同时，多能互补技术应运而生，将能量耦合装置与电网体位融合，利用多种能源缓解负荷高峰引起的

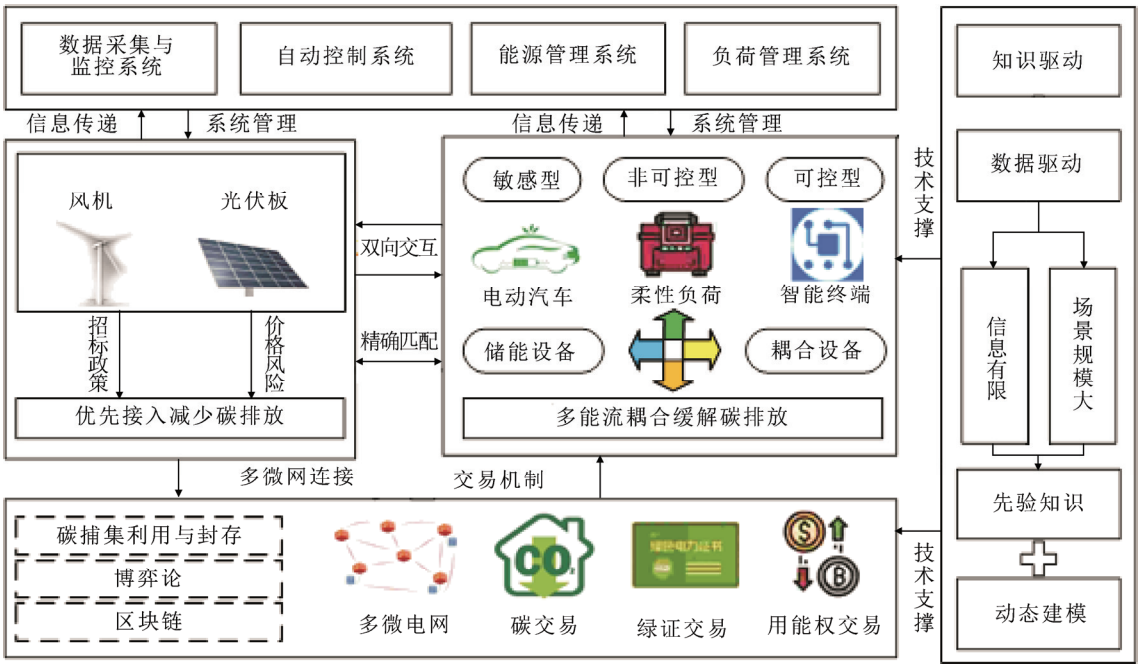


图 3 低碳经济微电网特点

Fig.3 Features of low carbon economy microgrid

碳排放超额问题。

(4) 能量流通灵活。微电网之间联系更加紧密，当某微网能源过剩或者不足时，与用户实现能源双向交互和与大电网进行能量传输。此外，不同微电网在市场交易体制下的行为也能有效反映低碳经济属性[26]。可以看出，能量关联的微电网呈现 2 个特征：①绿证交易和碳交易机制使得过剩资源充分流通，以完成资源向资本的转移；②通过多微网的合作博弈模型以及多群体决策模型实现分布式能量流动自治与集中协调优化的互动框架，最大化系统的整体经济效益。

(5) 求解算法性能提高。面向低碳经济的微电网包含更多数据信息，其复杂度和随机性导致数据维度势必提高。数据驱动、知识驱动为代表的新一代人工智能技术将发挥其不依赖模型的优势，在海量信息和大规模场景下根据输入数据动态建模[27]，以较少的先验知识高精度地完成更复杂的优化任务，在动态调控中获得微电网最优运行策略，实现环境效益和经济效益的最大化。

1.2.2 微电网低碳经济优化运行挑战

多能源紧密耦合、源荷不确定性增加等特点，以及低碳背景下对环保和碳减排的要求，给微电网优化运行带来了巨大挑战。

(1) 风电、光伏发电等可再生能源发电的产量具有间歇性和不确定性。尽管过去的研究中已经对太阳能辐照度和风速预测进行大量研究，但提高预测结果的精准度仍是巨大挑战。此外，用于预测的数据质量难以保证，进而导致预测结果非常不精准。对微电网来说，较大的预测误差会损害其可靠性，并需要更多的辅助服务，这将导致运行成本增加。

(2) 微电网已经逐渐摆脱电力传输的网络结构，天然气流、冷流、热流耦合已成为多能微电网的基础架构。同时，能量耦合设备使得微电网结构愈发复杂，如何调用源–网–荷–储等资源，实现各种可控设备之间的协调控制以便在选定时间范围内实现整体优化目标，进而通过联合优化运行对微电网低碳经济运行起到推进作用，仍是需要重点关注的问题。

(3) 微电网能量管理系统从系统层面管理微电网能量流动，但面临管理对象增多导致数据量增大，各行为主体决策不理性、冲突增多，多智能体运行机理难以厘清、对数据模型依赖性高等问题。如何利用人工智能技术和其他数学理论强化能量管理手段、是当前微电网能量管理面临难题之一。

(4) 微电网集群内的协调优化有利于实现可再生能源深度消纳和低碳经济运行，微电网群间的合作和能量共享问题有待研究[28]。单个微电网消纳可再生能源以及降低碳排放的目标可通过混合技术最大程度实现。从整体上看，实现某地区电力系统低碳经济优化运行才更具有现实指导意义。同时，包含多微网的市场主体在受到干预时将产生垄断或者少数特权者超额收入等现象。此外，碳交易机制赋予碳排放经济价值，克服了经济效益与环境效益评价不一致的问题。但在碳交易机制下，还需要具体的碳排放量化方法来评估碳排放，且系统的整体成本还需要考虑碳排放带来的额外环境成本[29]。因此要建立碳交易市场与能源交易的联系，从碳交易市场运行机理层面助力多微电网降碳。

2 微电网的优化运行原理

微电网优化运行是在组成单元的运行特性和边界条件的基础上，建立能描述系统运行特性的数学模型，通过求解算法得到满足各项指标的运行方案。在微电网优化运行中，源荷预测、能量优化调度、保护控制等技术发挥了重要作用，为实现不同目标，各种技术在碳交易机制，相变储能、需求侧响应等多种场景中得以应用。其优化运行机理如图 4 所示。

2.1 微电网运行优化模型

在决策变量的选取上，通常将设备运行状态和能耗率作为运行变量，碳排放水平和可再生能源消纳水平作为环境变量，并将源侧可再生能源和荷侧负荷的动态变化作为动态变量。

在优化运行目标的设定上，微电网优化目标函数通常是运行总成本[30]，这在经济上表明了电力部门的可承受性。为应对气候变化，落实节能和可持续发展理念，可再生能源消纳[31]、碳减排成效[32-33]等环境效益被纳入目标函数，如碳排放最小化和弃风弃光最小化等。微电网的优化运行总体目标是经济效益和环境保护效益的优化，环境目标通常与成本目标相结合。低碳运行的基本思路是：将碳排放或碳交易价格转化为相应的因素、变量或约束条件，纳入微电网的运行模型，进而提出兼顾环境和经济的系统运行优化策略。同时考虑满足用户的多元用能需求，尽可能提高可再生能源就地和异域消纳水平。此外必要时也需考虑微电网的安全稳定运行[34-35]。

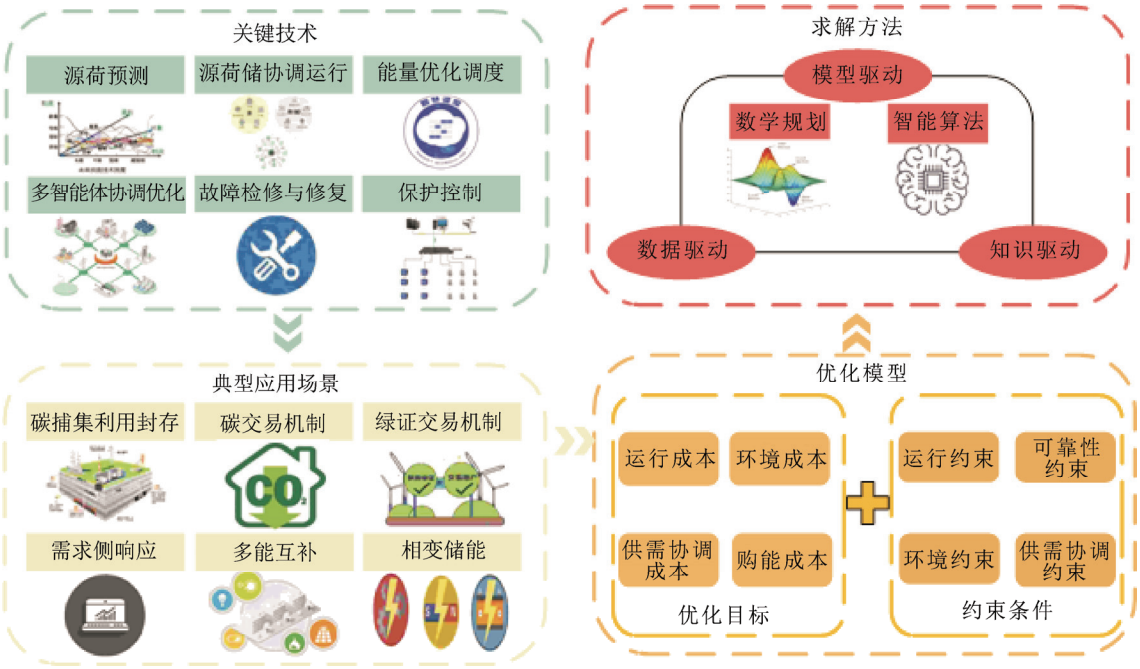


图 4 微电网优化运行原理

Fig.4 Optimization principle of microgrid operation

表 1 从优化运行目标、实施技术等方面对微电网优化运行模型进行了总结。从表 1 可以看出，微电网运行过程中的运营成本，可再生能源出力利用率与其发电成本，碳排放量以及可靠性、安全性等指标已经作为主要优化目标，并在考虑各方因素的情况下运用人工智能技术进行建模和求解，以获得微电网运行最优策略。

2.2 求解方法

微电网的优化运行通常是非线性问题。求解方法主要有数学规划和启发式算法。

表 2 为数学规划方法求解应用。YALMIP 工具箱可以调用外部求解器，允许使用统一建模并解决语言问题[36-39]。CPLEX 展示了解决线性规划问题的灵活性、可靠性和速度优势，可用于求解混合整数线性规划问题。另一种模型是混合整数非线性规划模型，对于大量非线性约束，通过线性化处理将混合整数非线性问题转化成混合整数二次规划问题，并利用求解器求解。数学规划具有求解线性规划问题、实现多变量最优决策的优势，但其对数据的准确性要求较高、计算量较大。

启发式算法具有全局搜索、收敛速度快、精度高等优点，在低碳经济优化运行中已经取得良好的效果。

遗传算法及其改进算法在优化运行问题中的应用如表 3 所示[40-43]。遗传算法从群体出发，具有潜在的并行性，可以与多个个体同时比较，同时具

表 1 微电网优化运行模型

Table 1 Optimal operation model of microgrid

文献	优化运行目标	实施技术	其他考虑方面
[31]	微电网经济性与风–光利用率	价格型需求响应优化负荷曲线、混沌烟花算法求解	实时电价引导用户行为
[32]	微电网低碳性与运行成本	多目标信息间决策建模、增强 ε 约束方法求解	加氢站与电动汽车、燃料电池互动
[33]	微电网低碳性和经济性	多时间尺度储能建模、碳交易价值降碳	多能量季节互补特性
[34]	微电网经济性和稳定性协调	拉丁超立方采样场景生成、下垂控制控制输出功率、微分进化算法求解	可再生能源出力随机性
[35]	微电网安全稳定运行	储能系统促进协调性、需求响应控制提升可靠性	—

表 2 数学规划求解应用

Table 2 Application of mathematical programming solution

文献	问题类型	研究问题	求解器
[36]	混合整数线性规划	微电网低碳经济调度	CPLEX
[37]	混合整数线性规划	风光出力及负荷不确定处理	CPLEX
[38]	混合整数非线性规划	区域综合能源多目标优化	GAMS
[39]	混合整数非线性规划	IES 综合能效提升	CPLEX

有可拓展性，进而容易与其他算法结合。经过改进的遗传算法具有如下特点：(1)寻优稳定，防止错过最优个体；(2)利用相似度交叉算子提高收敛速度；(3)全局收敛，鲁棒性强，适合高位数和复杂约束。但遗传算法依赖经验的参数选择影响解的品质，收缩速度和对初始种群的依赖也需要进一步改进。

模拟退火算法作为一种适合解决大规模组合优化问题的随机搜索算法，可应用于微电网优化问题中，如表 4 所示[44-46]。经过改进的模拟退火算法在微电网优化运行中呈现以下优势：(1)储存空间和计算量小；(2)避免陷入局部最小，克服总状态空间搜索算法的“组合爆炸问题”；(3)实现相对容易，具有很好的鲁棒性。但其最优解受迭代次数和冷却温度的影响较大。

粒子群算法通过群体中个体之间的协作和信息共享实现最优寻解，其计算效率高，收敛速度快且所需种群规模较小，但有时会陷入局部最优解。表 5 为改进粒子群算法求解微电网运行模型[47-49]，可以看出，经过改进的粒子群算法具有如下特点：(1)全局寻优，整数变量对应粒子在求解过程中的多样性；(2)收敛快不易早熟；(3)惯性权重自学习，学习因子控制速度。

由于信息的局限性和不完备性，许多决策需要使用模糊决策优化，模糊决策优化适合计算复杂的模型，并做出科学合理、接近实际的定量评价。文献[50]提出一种基于模糊决策的双存档多目标算法(two-archive many-objective evolutionary algorithm, TA-MaEA)来解决混合微电网的大小优化问题。文献[51]提出一种基于自适应最优模糊逻辑的能源管理解决方案，在存在运行不确定性的情况下，为实时能源调度制定适当的前置模糊规则。

源侧可再生能源出力难以精准预测，电源投资建设、运行成本受经济政策影响；电网侧极端天气和人为破坏造成输电线路故障不确定性；负荷在多种调节手段和政策共同影响下也会偏离理想值。面对诸多不确定性，鲁棒优化求解结果能适应最劣场景，适用于在不确定情况下提高微电网的灵活性和适应性。符杨等人提出一种微电网和配电网利益冲突下的多阶段鲁棒优化规划方法，最优化配电网运行成本和微电网群电源配置，并用鲁棒优化出力增长负荷带来的不确定性[52]。Yang 提出一种考虑风光出力、负荷不确定性的微电网鲁棒优化模型，平衡微电网的经济性和稳定性[53]。

表 3 遗传算法及其改进算法求解优化问题

Table 3 Genetic algorithm and its improved algorithm to solve optimization problems

文献	研究问题	改进算法
[40]	微电网成本与温室气体排放	遗传算法
[41]	电动车充放电行为储能容量影响	精英策略的非支配排序遗传算法
[42]	含蓄电池的微电网并网优化调度	Pareto 寻优路径非支配排序遗传算法
[43]	降低微电网的调度成本	基于个体的最优遗传算法

表 4 模拟退火及其改进算法求解微电网优化运行

Table 4 Simulated annealing and its improved algorithm for optimization of microgrid operation

文献	研究问题	改进算法
[44]	微电网最佳收益策略	模拟退火
[45]	微电网最佳尺寸	模拟退火粒子群算法
[46]	提升光伏消纳	改进模拟退火算法

表 5 改进粒子群算法求解微电网优化运行

Table 5 Improved particle swarm optimization algorithm to solve the optimization of microgrid operation

文献	研究问题	改进算法
[47]	微电网优化配置、降低弃光量与碳排放	改进的快速粒子群算法
[48]	微电网短期经济环境问题	差分进化改进粒子群算法
[49]	微电网负荷调度多目标优化	粒子群引力搜索

一些其他方法比如禁忌搜索、灰狼优化、蚁群优化、白头鹰优化等也用来解决此类问题，如表 6 所示[54-56]。但由于优化问题的多样性和复杂性，这些群体智能算法在不同的应用中仍会存在一些不足。为了解决模型结构复杂、包含多个变量和非线性约束的问题，有必要对这些算法进行改进。

3 人工智能赋能微电网优化运行关键技术

微电网优化运行是数据输入—计算求解—优化策略的全过程。面对大量接入的可再生能源的随机性，可靠的可再生能源预测技术是获得提供可信度高的输入数据的关键。微电网设备增多亟需源–网–荷–储多组件协调运行策略来实现整个微电网的安全高效运行。在确定多组件协调运行之后，从能量管理系统级进行中央管控，进一步落实微电网低碳经济运行策略。随着区域能源系统的发展，微电网除了孤岛和并网运行以外，互相连接也为能量流动提供更为高效的落脚点，结合市场机制研究多微

表 6 其他智能算法优化运行

Table 6 Other intelligent algorithms run optimally

文献	优化算法	求解问题
[54]	禁忌搜索算法	经济负荷分配
[55]	灰狼算法	经济环境指标下的优化调度
[56]	白头鹰算法	微电网独立于并网运行能量管理策略

电网间的能量交易技术提高能源的利用效率，碳交易市场机制反映微电网运行低碳属性。最后，研究高开放性、强不确定性背景下微电网人工智能不确定性调控技术将为其高效安全运行提供有力支撑。优化运行过程中的人工智能技术应用如表 7 所示。

3.1 人工智能+多模型可再生能源预测技术

风、光等新能源接入给微电网带来了更大的波动性、时变性和随机性。研究表明，处理可再生能源的可变性和随机变化具有较高的成本，给维持微电网能源生产和消费之间的平衡带来困难。准确的可再生能源预测可实现其最佳利用，有助于微电网的优化运行和能源调度。

运用适当的预测技术来预测发电对于克服供需不匹配问题至关重要。目前已开发出许多方法，以在不同尺度预测可再生能源出力。根据预测时间范围分成超短期(5 s~0.5 h)、短期(0.5~6 h)、中期(6 h 到 1 d)、长期(1 d 到 1 周)。超短期预测旨在实现可再生能源发电机的动态控制和负载跟踪。短期预测用于调度电源、负载和存储设备之间的能量流。中长期预测分别负责价格结算、负荷调度和维护调度。现有可再生能源出力预测方法主要可以分为物理模型、统计模型、人工智能模型和混合模型。

数值天气预报(numerical weather prediction，NWP)是物理方法的基础，使用 NWP 风速/太阳辐照度预报作为输入数据，其中气象过程的变化由大气中尺度模型或全球数据库描述。物理模型不需要历史数据的训练输入，但观测资料的丰富性、数值预报的时效性、大气规律的复杂性都会影响其精确度。但是，NWP 需要大量数据校准空气动力学，以计算资源规模。同时，NWP 的预报误差、预报点据风机/光伏的空间距离等会造成实测数据与预测数据的误差[57]。

在统计方法方面，预测值与指定时间内的历史数据呈线性相关。常用的统计方法包括自回归(autoregression, AR)、移动平均线(moving average, MA)、自回归移动平均模型(autoregressive moving average model, ARMA)、自回归积分移动平均线(autoregressive integrated moving average, ARIMA)、贝叶斯方法、灰色预测、Box-Jenkins 等，其中 Box-Jenkins 方法基于 ARIMA 或季节性调整 ARIMA 模型，也称 SARIMA。它们易于建模、与其他模型相比开发成本更低，并且适用于短期和超短期预测。文献[58]基于风电历史数据的时间序列建立 ARMA 模型，证明其在出力超短期预测的高精确度，但随着时间的延长，预测精确度逐渐下降。因 ARIMA 具有预测方便准确、数据输入要求低、计算过程简单等特点[59]，文献[60]考虑收集数据的准确性、实用性、充分性和及时性，建立时间序列 ARIMA 模型来预测韩国首尔的日和月太阳辐照度。灰色预测模型适用于产生不良、不完整或不确定情况，可以用少量数据估计位置系统[61]。传统的统计方法大多针对超短期和短期的预测。这些模型易于制定，并能够提供及时的预测。随着预测精度的提高，传统的统计方法通常作为参考模型。

表 7 微电网人工智能技术优化运行应用

Table 7 Application of artificial intelligence technology in microgrid optimization operation

优化运行技术	优化技术领域	应用人工智能技术
可再生能源出力预测	物理模型–数字模型–人工智能模型–混合模型	NWP、ARMA、贝叶斯方法、ANN、EMD、SVM 等
微电网优化调度	多源异构单元协调运行	需求侧响应、智能调控、启发式算法
	能量管理系统优化	FLC、ANN、MAS、RL
	多微网能量交易	P2P、区块链、博弈论
	碳交易市场机制	多级阶梯式交易、LAC
不确定条件下微电网优化调控	物理设备信息耦合不确定性、源–荷–网–储设备参数不确定性、故障类型不确定性等	虚拟采集、元包自动机、深度学习等

人工智能模型包括人工神经网络(artificial neural network, ANN)、逻辑模糊方法、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)支持向量机(support vector machine, SVM)、神经模糊网络、自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)等。基于人工智能模型的预测方法由于其先进的数据挖掘的特征提取功能，通常会获得更为准确的预测结果。人工神经网络在解决复杂关系、自适应控制、图像去噪、不确定性下的决策和预测模式等方面具有强大的能力，已成为最引人注目的技术之一。基于神经网络的方法能够表示复杂的非线性关系，并通过训练过程提取变量之

间的依赖关系。它们包括反向传播神经网络、循环神经网络、径向基函数神经网络、脊波神经网络和自适应线性元神经网络。文献[62]指出，基于神经网络的方法以及其他人工智能方法(如支持向量机)、传统的统计时间序列分析在相似条件下的性能优于物理模型，基于 ANN 的预测方法相比于 ARMA 更省时，但基于 ANN 的方法硬件依赖性强，网络可解释性差，网络持续时间未知。

混合模型可以充分利用多种预测算法的优点，减少个别方法局限性带来的影响，不仅提高了预测精度，而且不需考虑预测位置，节省了大量时间和计算资源。目前主要分为 2 种类型：一种是将统计模型与人工智能模型结合，例如 ARIMA-ANN、ARIMA-SVM 等模型，已经在风电出力预测上显示出一定的适用性；另外一种是将多种人工智能模型融合，多模型融合预测方法及贡献如表 8 所示[63-66]。

除此之外，还将智能优化算法与预测方法结合，以提高预测的准确性。在数据预处理方面，利用小波变换(wavelet transform, WT)和 EMD 对风速序列进行分解，减少随机干扰。文献[67]采用基于小波变换、遗传算法和 SVM 的混合方法，用小波变换风速序列，并用遗传算法调整的 SVM 预测风速。在参数优化方面，文献[68]不同于以往的点估计，通过建立预测区间来评估风电不确定性。为提高混合模型的性能，数据挖掘技术和深度学习同样在风光发电预测中表现良好，也是未来研究的重点方向。

表 8 混合模型预测方法

Table 8 Hybrid model prediction method

文献	混合模型	方法贡献
[63]	ARIMA-ANN	ANN 解决了由 ARIMA 引起的非线性预测误差
[64]	EMD-ARIMA-SVM	EMD 分解风速子序列，ARIMA 用于预测子序列的风速，SVM 重构和预测所有子序列的预测误差，混合模型精度更高
[65]	EMD-BPNN	EMD 分解光伏序列，训练反向神经网络(backpropagation neural network, BPNN)
[66]	Fuzzy-ANFIS	模糊逻辑较好地解决了数据的不确定性问题，适应不同地区光伏预测

3.2 人工智能赋能微电网优化调度

微电网合理制定能量调度策略需要精确的可再生能源出力预测结果作为保障、调度计划的生成在可靠预测输入信息的支撑下将更贴合实际。若将较大的预测误差结果作为能量调度计划的直接依据，不仅难以使微电网能量调度计划贴近实际运行曲线，还会带来负面影响。在微电网获取可再生能源预测出力数据之后，通过多源异构单元协调优化运行技术促进源–荷–网–储协调运行，并依靠人工智能赋能技术和先进数学理论结合协助能量管理系统优化运行，进一步通过多微电网能量交易来消除各微电网间能量剩余和补足缺额，以提高能量利用率，促进区域碳排放水平和经济性最优平衡。此外，仅以经济性为目标很难减少碳排放量，在微电网优化调度中考虑经济和环保因素，从而达到微电网运营成本最低目标和碳减排要求。碳交易机制分配初始碳排放配额，配额与实际间排放差值的奖惩制度驱动微电网主动调整机组设备处理来达到降碳和经济性的目的。

3.2.1 多源异构单元协调优化运行技术

微电网在传统微电网的基础上向多能化发展，冷热气等多能流与微电网关系愈发紧密。电转气、吸收式制冷机等能量耦合设备的接入虽然使得微电网具有能量利用率高、调度灵活等特点，但也使其结构愈发复杂。微电网中的碳资产难以管理、碳路径难以精准溯源也为微电网的低碳优化运行带来挑战。因此，需充分考虑微电网源–网–荷–储等资源特性，制定多组件协调优化策略，提高新能源消纳率、降低微电网碳排放，以实现微电网安全可靠、低碳经济运行。

微电网合理规划是高效运行的基础，微电网运行的经济效益、减排能力、安全可靠与设备容量配置是否合理有直接关系[69]，在规划设计时要综合考虑运行优化的因素、根据系统生命周期内的运行数据和信息进行合理的规划和优化设计。但多数源–网–荷–储协调规划主要从经济角度进行，可再生能源上网消耗责任以及碳排放权重等低碳因素应考虑在内。煤炭消费比重、新能源装机规模以及消费责任权重、储能利用率和电网用户满意率等微电网不同层次目标需要计入协调规划模型，并利用多种优化手段、系统工具、信息交互等技术在最大化资源和可再生额能源利用率基础上提高微电网整体动态平衡，实现安全、经济、低碳等多目标[70]。

源–网–荷–储之间的协调运行可以有效促进可再生能源消纳，降低微电网运行成本和网络损耗。在充分考虑微电网源–网–荷–储各侧可调度资源后，提出“源–源互补”、“源–网协调”、“源–网–荷–储互动”策略。

“源–源互补”实现电源侧可用资源的协调和互补，包括 2 个方面：一方面可再生能源能源与传统发电资源协调，可缓解大范围内可再生资源出力的随机性和间歇性，使得微电网供电更加安全可控[71]，风光出力可通过调峰电源调节，多余的可跨区域输送；另一方面将需求侧资源与发电测资源同等化，利用需求侧响应技术降低负荷波动特性对微电网的不利影响，并通过负荷调节可再生能源消耗率，实现微电网与用户的双赢[72]。例如在文献[73]中，荷侧基于激励需求侧响应转移负荷并基于分时电价削减负荷，在源侧实现交流区和直流区可再生能源的互补利用，在网侧进行微电网与大电网的电能购售。

“源–网协调”扩大电网接纳多元化发电源能力，利用智能调控技术、优化技术和信息技术，在“源–源互补”思想指导下发挥不同电源、不同组合方式的互补性和协调性，缓解新能源出力与网损率之间的矛盾。实现分散和集中层面攻击资源优化，利用电能异域传送满足不同微电网的需求，提供灵活调节能力。对于源侧的不确定性，随机概率场景、不确定场景集、机会约束模糊规划等技术手段已经应用广泛。

“源–网–荷–储互动”将储能、电动汽车、用户侧资源视为广义需求侧资源。储能设备有序充放电、引导需求侧用电负荷主动跟踪源侧出力，协助提高微电网供需时空匹配度。氢储能作为无污染的清洁储能方式已经广泛应用于微电网中，文献[74]提出一种基于光伏的电–氢混合储能微电网优化框架，实现微电网针对不同时间尺度的能源供需不匹配的优化。此外，通过储能充放电控制调整不平衡功率交互曲线进一步提高储能投资效益，提升“源–荷–网–储”各部分自适应控制能力，提高供能可靠性和质量。在储能资源与可再生能源建立局部独立交易，就近吸收分布式能量，提升微网自平衡能力。微电网需求侧加强管理，自主确定峰平谷电价，优化微电网与外部能量交换不平衡曲线，减小峰谷差。源–网–荷–储一体化协调运行模式下，就地就近消纳分布式可再生能源，大幅度代替化石燃料来减少碳排放，并获得更为丰厚的投资回报。

3.2.2 系统级微电网能量管理优化技术

EMS 在满足系统约束条件的同时，兼顾了供给侧和需求侧管理，在微电网低碳经济运行过程中承担重要责任。EMS 提供了许多好处，覆盖从发电调度到节能、无功功率支持到频率调节、可靠性到损失成本降低、能源平衡到减少温室气体排放以及客户参与到客户隐私[75]，但能源管理方案的复杂性随着微电网终端负荷数量的增加以及可再生能源的高比例利用呈指数级增加，因此需要一种最优的能量管理技术来提高 EMS 的性能。传统方法如启发式算法、模型预测控制、混合整数规划等方法已经应用于优化 EMS 管理方法，本章更多关注模糊逻辑、多智能体技术、神经网络、强化学习等人工智能技术在该领域的应用。

EMS 集成在微电网中需要一个控制系统来管理间歇性可再生能源的调度，模糊逻辑控制(fuzzy logic control, FLC)可以通过易于理解的语言规则促进微电网控制策略的实施，实现微电网执行多种功能时的有效控制，其主要功能之一为控制电池储能的荷电状态(state of charge, SOC)，并延长寿命、提供平稳运行[76]。此外，FLC 用于考虑电热需求的不确定性，控制减载、一氧化碳排放以及降低能源利用成本等过程。但是，模糊逻辑仍存在速度慢、缺乏实时响应、无法接受学习策略反馈等缺陷。通过调整隶属度函数优化 FLC 系统可以提供更高程度的精确控制，从而提高运行效率、降低系统成本并平衡发电–用电环节[77]。对于电动汽车并网型微电网，通过监控电动汽车 SOC、控制电动汽车充放电行为能减少电动汽车大量整合对微电网的电能质量、正常运行和投资成本产生的负面影响[78]。

ANN 具有鲁棒性和处理动态系统中复杂非线性关系的能力，适用于涉及不完整数据集、不完整信息传统方法难以解决的场景。文献[79]提出基于 ANN 的 EMS，用于控制 AC-DC 混合微电网的功率，通过收集分布式发电提供的功率、负载需求和 SOC 等数据来选择最佳工作模式。在交直流混合微电网中，为解决储能系统充电容量有限影响微电网运行的问题，文献[80]提出了一种基于人工神经网络的 2 步混合式微电网管理系统，与只有一个隐藏层的多层人工神经网络相比，其减少了学习负担，并且通过学习单个步骤可以实现简单的结构变化。上述研究中，ANN 发挥其能够管理大量数据和输入变量、自学习和持续服务、兼容性强等特点，但是其功能需要训练、花费时间较长且依赖大数据支持等特点限制 ANN 管理 EMS 能力进一步发展。ANN 和启发式算法结合可以提高混合微电网在能源管理领域的性能。文献[81]提出一种基于递归神经网络(recursive neural network, RNN)的智能 EMS 技术，

借助蚁狮优化器(ant lion optimizer, ALO)算法实现微电网能量调度，其中 RNN 用于负荷需求预测，所提方法能够分析技术和经济时变约束，以最小的能源成本满足所需的负载需求。文献[82]提出一种微电网能量管理混合控制技术，由细菌觅食优化算法(bacterial foraging optimization algorithm, BFOA)和 ANN 结合，其中 ANN 用来预测 24 h 的光伏、风机燃气轮机和电池需求。上述基于 FLC 和 ANN 的研究关注微电网能量管理系统运行性能和经济效益方面的提升，但对计算复杂度、客户隐私问题、系统可靠性等因素尚未详细评估。

大多数微电 EMS 基于中央控制模式，中央控制器收集发电量、成本函数、用户耗能模式等信息，并由 EMS 确定最优能量调度策略。但随着发电机和负载增多，EMS 指数级增长，需要更新配置并依赖计算能力更强的算法。多智能体系统(multi-agent system, MAS)通常是由多个交互式智能体组成的计算机化系统，每个微电网都是一个智能体，多智能体间使用智能体通信语言(agent communication language, ACL)协议进行通信[83]，智能体结构的分布式特性将使这种优化技术能够用作微电网 EMS 中的分布式控制策略[84]。基于 MAS 的分散式控制结构能提高 EMS 的可靠性和鲁棒性，单个控制器故障不影响其余部分工作[85]。不同级别的智能体可以识别和快速响应环境变化，提升可再生能源出力灵活性，还允许在不需重新配置系统的条件下集成更多分布式电源及负载，为微电网提供基于各类电源输出特性的控制方案以及兼顾性能和成本平衡的控制策略[86]。为应对分布式发电和高随机性的负荷集成对传统无模型微电网市场管理提出的挑战，当面对更复杂的多智能体联合优化运行模型时，深度学习、交互式学习、迁移学习等方法将应用于电动汽车集成、多微电网、综合能源系统等场景。

强化学习(reinforcement learning, RL)利用贝尔曼方程实现全局最优，具有出色的决策能力，能够在缺乏对环境初步了解的情况下解决问题。根据“无模型”和“不需要先验领域知识”范式的独特特征，RL 已成为优化能源系统控制的有力工具。为应对微电网能量管理过程中的不确定性，文献[87]提出一种基于多参数动作探索机制的改进竞争深度Q网络算法，能够动态适应微网环境输出最优管理策略，并为微电网运行提供更为经济的方案。为应对负荷、可再生能源和电力市场位置边际价格的不确定性，文献[88]将微电网能量管理问题变数为马尔可夫决策过程(Markovian decision process, MDP)，提出一种深度 Q 网络的深度学习算法。该算法使用深度前馈神经网络来近似最优动作值函数，并学习在端到端范式中实时调度。为增强微电网需求侧灵活调度能力，文献[89]在训练过程中增加了具有经验重放池内存库的异步优势，MA3-C 的多线程工作特性能高效学习微电网需求端的资源优先级分配，提高了微电网需求端的灵活调度，大大降低了投入成本。在微电网储能系统调度方面，文献[90]利用双重深度Q学习算法，获得储能系统充放电控制最优策略。文献[91]提出了一种与蒙特卡洛树搜索(Monte Carlo tree search, MCTS)相结合的 RL 解决方案，以解决微电网电池储能系统的多周期随机优化问题。虽然深度强化学习算法已经应用于微电网能源管理中的不确定性处理、需求侧灵活调度、储能系统控制与优化等方面，以解决决策泛用性差、领域专家重复开发、运维成本高等问题，但其训练时间过长、对训练数据依赖大的问题仍需进一步解决。

3.2.3 多微网能量交易技术

在微电网的低碳进程中，能源互联网与微电网深度融合，来实现多能协同互补和可再生能源消纳。随着同一地区能源互联微电网的增加，相邻微电网形成互联的多微电网系统。微电网之间通过能量相互作用，当自身可调度资源不足时，可寻求其他微电网的支持以提高经济性、环保性和可靠性。随着储能技术和智能电网技术的发展，能源交易市场中的主体同时承担消费者和生产者的角色。随着建设成本低、社会收益高、适用性强的能源交易机制进一步开发利用，研究多微电网能源交易来降低用电成本、支撑区域可再生能源协调控制、减少碳排放具有发展意义。在基于博弈论机制的能源交易机制中，每个参与者的决策互相影响，微电网根据需求购售能量促进可再生能源消纳，降低碳排放；区块链技术具有数据透明度和可靠性，适用于去中心化系统结构中的数据分析与决策，支撑微电网交易市场去中心化、安全性、公平性。点对点(peer to peer, P2P)、区块链、博弈论作为市场机制下多微电网能量交易关键技术，助力多微电网内个体与总体的利益平衡，提高新能源局部容纳率，减少微电网运行过程中的碳排放，多微网能量交易技术体系见图 5。

P2P 能源交易是一种新型电力市场模式，允许同时作为能源生产者和能源消费者在连接的网络

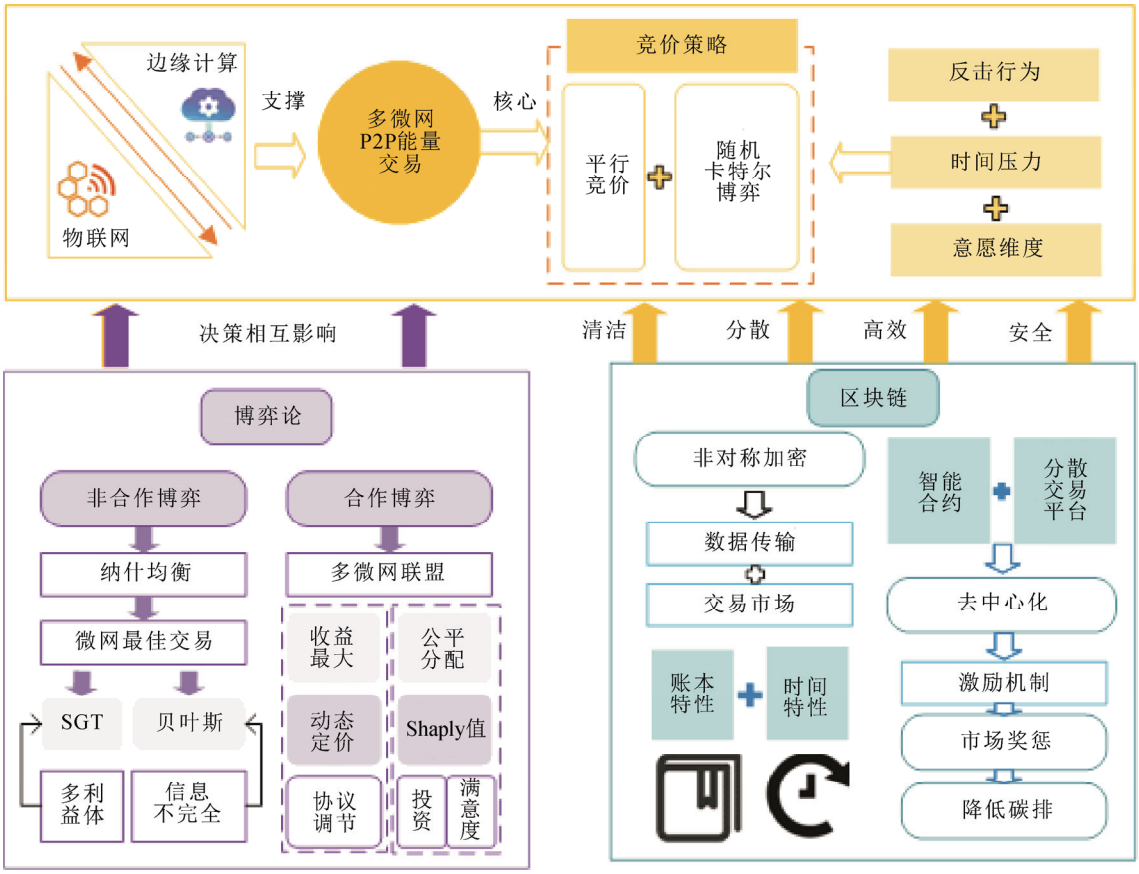


图 5 多微网能量交易技术

Fig.5 Multi-microgrid energy trading technology

中交易能源，不受中央系统的直接干预。与传统点对网的交易方式不同，P2P 为多微电网互相买卖能源提供平台，具有更好的灵活性、可靠性、削峰能力。文献[92]提出基于物联网和边缘计算技术的多微电网 P2P 电能共享架构，依靠通讯手段助力微电网在能量短缺/剩余时优先与其他微电网优先交易。文献[93]设计了基于 P2P 的能量–碳耦合交易市场，根据实时电–碳价格制定发用电行为和购售角色，挖掘用户侧减排潜力，激发市场活力与灵活性。P2P 能源交易机制的核心是 P2P 能源竞价策略的设计，就此问题，文献[94]设计考虑反击行为、时间压力和其他意愿维度的平行竞价框架，文献[95]建立卡特尔非线性规划模型来整合多微电网的联合招标以及 P2P 能源交易。

区块链作为一种创新技术，具有去中心化、透明、可信度高的优点，旨在提高安全性和分散交易[96]，已经在电力供应、负荷测量等能源领域的不同环节发挥作用，比如碳排放认证、虚拟发电权交易、多能协作和信息管理等场景。微电网因其包括分布式新能源、储能等环节，其电力交易不同于传统的电力交易。交易模式不再是以网格为中心的交易模式，而是自主、自发、随机匹配，具有以下特点：(1)区块链技术可以促进多微网市场交易的安全性。使用非对称加密原理对数据进行加密，既保证了数据传输的安全性和可靠性，又为多微网交易市场提供了安全保障[97]。(2)在传统的市场竞争中，各市场主体产生的交易信息需要反馈到电网交易中心进行统一发布，再组织市场主体进行竞价。招标成功后，调度中心统一实现经济调度。这种方法增加了信息流通的环节，降低了信息的时效性。然而，区块链网络中没有中心节点，可以支持电力市场的点对点交易。未来参与电力市场的主体将越来越多，市场交易将更加频繁，自适应、去中心化的电力交易将成为主流，文献[98]提出配电侧多微电网电能交易模型并搭建交易平台和部署智能合约，在智能合约中引入双向拍卖定价机制以提高参与者的利益。文献[99]提出一种基于区块链技术的多微电网电力竞价交易模型，构建分布式“多买方、多卖方”的市场，实现源销一体化。(3)区块链作为一个大型分布式数据库，可以记录每一笔市场交易的全部信息。信息

的完全披露和时间戳技术大大减少了市场寻租行为，让市场主体在市场规则下进行规范合理的市场行为，以此来促进竞争的公平性。区块链的账本特性和时间特性造就了完全信息条件下市场主体之间的竞争。基于区块链的特点，可以实现公平的市场竞争。(4)区块链技术可以完善多微网市场竞争奖惩机制。基于区块链技术的多个微网市场主体之间的竞争，增加了大量的激励和惩罚机制。基于智能合约的激励机制可以深化市场化程度，鼓励提高清洁能源利用水平，有效减少对外部环境的碳排放[100]。

博弈论驱动的决策策略已经被广泛应用于多微电网间的能源交易。博弈方法一般分为非合作博弈和合作博弈。非合作博弈强调参与者个体利益大于整体利益，各参与主体通过做出决策来使自身利益最大化，得到的纳什均衡点通常是局部最优值。合作博弈更强调整体利益，多微电网通过合作使整体利益最大化，进而在联盟内部通过利益公平分配来提升个体利益。文献[101]系统阐述了基于博弈模型的能源交易市场定价机制，介绍了 Cournot、Stackelberg、Bertrand 等博弈模型在定价策略中的应用。文献[102]主要针对多微网能源交易竞争问题，在构造收益相关效用函数的基础上，将能源竞争问题转化为非合作博弈问题进行求解，进而以纳什均衡作为微网最佳交易策略。而在纳什议价的谈判崩裂点的选择上，文献[103-104]分别选取微电网与配电网运营商最优运行成本和多微网非合作运营模式下的运行收益。斯塔克尔伯格博弈(generalized Stackelberg game, SGT)是处理多层次、多利益相关方利益互动的有效方法，文献[105]将多微电网(muti-microgrid, MMG)和配电网能量交易问题转化成单领导者、多跟随者的 Stackelberg 博弈问题，采用电价激励机制引导微电网运营商参与能源交易，提高区域电网能源共享水平。上述博弈模型主要基于完全信息情况，贝叶斯博弈模型则用来处理博弈过程中的信息不对等、不完整问题。文献[106]为应对电动汽车接入微电网造成的不确定和信息不完全问题，建立贝叶斯–斯塔克尔伯格博弈模型。在合作博弈的推动下，多个微电网组成微电网联盟，在某种协议的约束下完成 2 种任务：一是通过过对多微电网系统进行联合经济调度来实现群体合理性，其目的是最大限度地降低总运营成本；二是对参与主体进行公平分配，使个体从中获利。与非合作博弈相比，文献[107]中的合作博弈提出了更具有约束力的协议来调节微电网间的利益冲突。文献[108]针对社群内光伏微电网群，提出一种基于合作博弈的市场交易体制，通过高级量测体系(advanced metering infrastructure, AMI)共享光伏和负荷功率，先在微电网内部交换电能，再与配电网进行交易，提升总体收益，再利用 Shapley 值法分配收益，最后提出一种实时交易计算规则来理清现金流流向。文献[109]提出一种依赖不同能源资源和各种场景的动态定价机制，以实现交易中合作收益最大化，同时，该文献基于 Shapley 值的方法考虑每个微电网的贡献、投资和满意度来公平分配收益。文献[110]探讨了多微电网接入配电网时的潜在合作，并基于核心解决方案在合作博弈中解决了后续的公平成本分配问题。其结果表明，通过本地电力交换充分利用可再生能源、微电网之间的合作可以大大提高运行经济性。

3.3 微电网碳交易市场机制

微电网能量优化调度获得的最优效益无法体现微电网的低碳性，碳交易作为一种以碳配额为交易主体的交易机制，目前已经成为微电网降碳主要手段之一，碳交易市场市场组成如图 6 所示，主要包括碳配额分配、碳交易价格和碳交易商品 3 部分。碳配额分配在碳排放市场中具有基础性和关键性作用，一般分为基准线法、历史排放法、历史强度法和拍卖法[111]。碳交易价格包括单一碳价、阶梯碳价和基于市场出清价格，碳交易商品除了碳排放权外，还包括碳抵消商品等。

政府为微电网免费分配碳排放初始额，微电网根据自身的实际排放量与初始分配额判断是否要购买/出售碳排放额，其中能源流–信息流–资源流在各部分之间流动，并在碳交易平台统一结算。在当前碳交易市场壮大形势下，微电网参与碳交易获得降碳目标下的收益，其运行机制如图 7 所示。

文献[112]建立考虑碳交易机制及综合需求侧响应的多微能网分布式协调调度模型，利用需求侧碳交易机制将碳排放成本计入碳使用者，引导主网及微能网优先消纳新能源。文献[113]设计了两级碳交易多微电网优化模型，微电网可与配电网进行阶梯式碳交易，在微电网间也可通过碳排放配额共享实现议价型碳交易。然而，上述文献中碳排放量与出力直接相关，缺乏对温室气体的准确定量分析方法，采用生命周期分析法(life cycle analysis, LCA)对碳排放定性定量分析，有利于优化微电网运行，进而达到节能减排的作用，其步骤如下：首先确定

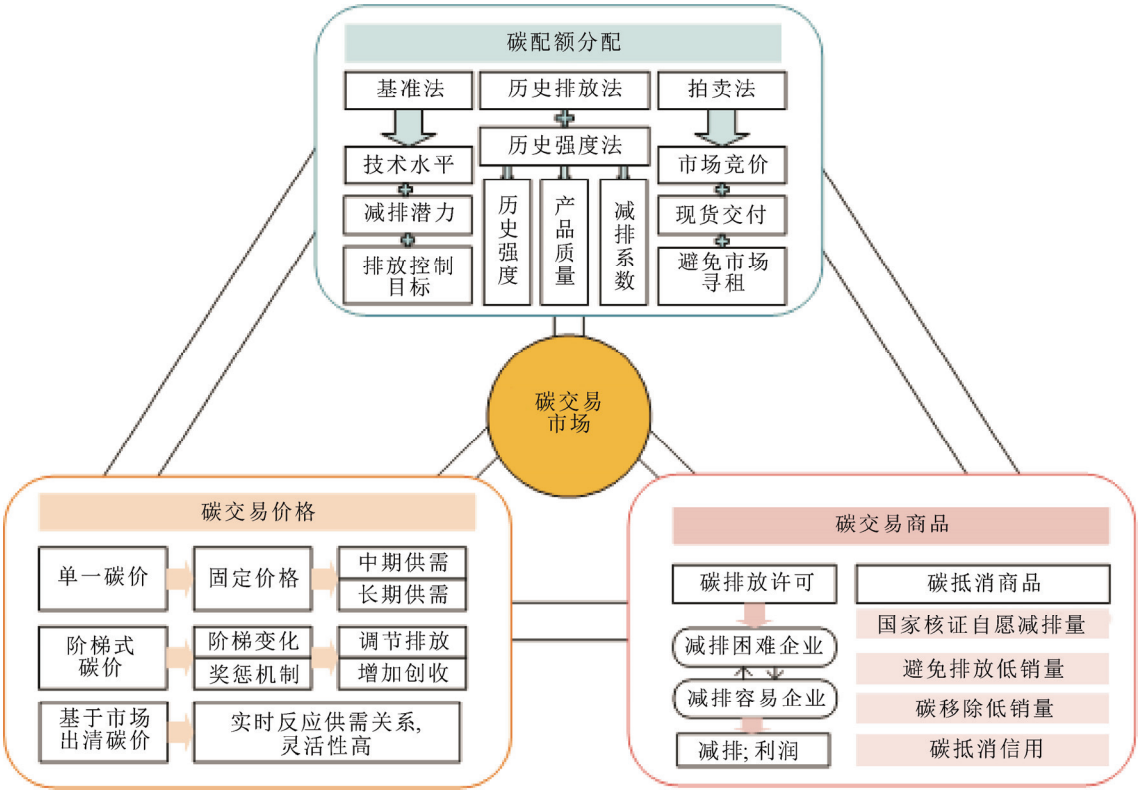


图 6 碳交易市场组成

Fig.6 Composition of carbon trading market

CO_2 作为衡量指标；其次对能源不同环节进行分类；最后计算不同能源活动中的碳排放系数，求解得到碳排放量。此外，碳交易机制与 P2G、碳捕集系统[114]等相结合，可在微电网低碳经济运行中起到补充作用。

3.4 不确定条件下人工智能融合优化调控技术

微电网优化运行过程不仅需要考虑源荷波动的不确定性，其物理设备信息耦合不确定性、源–荷–网–储设备参数不确定性、故障类型不确定性等问题仍需运用新一代人工智能技术加以解决。但目前在微电网具有高度开放互联、强不确定性、信息能源深度融合和系统脆弱性增强的背景下，传统的集中式调控策略难以及时、有效、准确、安全地对其进行管控。亟需发展人工智能技术提升不确定环境下微电网模型和算法，为其高效安全运行提供有力支撑，推动人工智能技术、信息技术与电力能源的深度融合发展，推进“双碳”目标落实，实现节能减排。具体可以分成以下几个方面：

(1) 针对微电网信息物理耦合不确定性强、多模态信息感知难的问题，基于虚拟采集技术[115]和循环式运动规约技术对微电网信息进行非侵入式采集，利用异构区块链技术和多输入自主时空聚类方法实现数据的自主精准检测。基于多神经网络融合的叠层宽度学习半监督主动感知算法对信息物理耦合不确定性和多模态信息进行主动感知与分解。

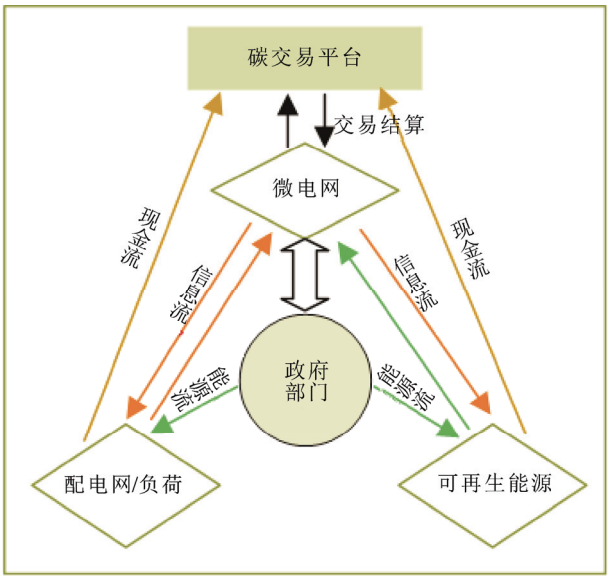


图 7 碳交易市场运行机制

Fig.7 Composition of carbon trading market

(2) 针对单微电网源–荷–储关联复杂、参数不确定的问题，应用元胞自动机–仿真技术揭示单元级和系统级的动态交互机理，构建单个微电网信息物

理动态模型。采用深度融合神经网络自主辨识算法实现模型关键不确定性参数的自主辨识，并利用先验知识对所获参数进行校准和训练。

(3) 针对微电网多模态随机场景中故障类型不确定、场景复杂的问题，基于深度森林多标签学习算法挖掘随机场景中的多模态数据特征，实现故障模式筛选，并基于时空潮流数据的储备池网络预测方法，实现微电网薄弱环节自主推理。利用面向滚动校正的行为可预知的在线深度学习算法，减少高度纷杂信息带来的决策风险，实现开放环境下微电网独立运行时的源–荷–储安全经济自适应协同趋优。

(4) 针对多器件多能流多层面的微电网结构高度复杂、资源分散无序的问题，基于变分自编码器的微电网内源荷储资源自主聚合方法实现微电网内源荷储资源的时序特征降维和聚合，为群智系统的优化运行建立基础。基于面向滚动校正的行为可预知在线深度学习算法，减少高度纷杂信息带来的决策风险，实现开放环境下微电网独立运行时的源–荷–储安全经济自适应协同趋优。

(5) 针对微电网群的经济运行多方利益主体诉求各异、交易频繁、不确定性强的问题，利用区块链技术构建微电网群分布式动态交易数据库，基于非均等代价学习的目标引导的开放市场获得最优经济运行策略，进而提升面对不确定问题时的处理能力。

4 微电网优化运行展望

在微电网稳定性方面。微电网包含多次交流/直流转换过程，微电网中交直流子系统共享功率会给整个系统带来稳定性问题。但接口转换器降低系统可靠性、多转换器并联带来非线性负载行为等问题需要重点关注。分布式发电机在网络中的渗透会产生许多质量问题，例如电压波动、谐波失真、电压浪涌和频率偏差等。此外，分布式发电机的可变输出会产生反向潮流问题。在混合微电网的情况下，这些电能质量问题被放大。

在微电网 EMS 建模方面，电力供应的可靠性、微电网的稳定性以及对恶劣情况的鲁棒性在一定程度上取决于 EMS 的性能。而 EMS 的性能很大程度上取决于建模精度和计算量，而目前研究中微电网设备数学模型较少、精度也不够，比如设备效率对工作点的关系、储能系统与工作条件、设备老化等关系，这是因为精确的模型会增加问题复杂性和计算时间，且依赖大量实验数据。目前 MG 设备建模多基于经验模型或物理表达式，但此种方法并不适用于所有物理模型。因此，需要一种平衡准确性、复杂性、物理可解释性和计算复杂性的建模方式。

在能源交易方面，区块链技术使得交易平台更加安全高效，但如何在使用过程中保持和提高各参与者的安全级别，以及降低使用过程中产生的能源消耗，需要进一步研究。此外，区块链技术还需要昂贵的基础设施和通信技术设备支撑。当电力交易量较大、用户隐私受到威胁时将会造成巨大损失，区块链的非对称加密机制将愈发脆弱；区块链的发展很大程度上也会与法律法规产生冲突，需要制定合理的规则使得区块链在合理范围内应用。博弈论用来模拟不同微电网的参与行为，但建模过程并未考虑复杂的非理性用户行为，将动机心理学与博弈论相结合，为交易过程添加更多的因素，将得到更加真实的产销、竞价行为。

在碳交易机制完善方面，目前的碳价格理论来源于均衡价格理论和边际效用理论，认为价格是由供求关系决定的。目前还没有关于碳市场需求价格弹性的研究，因此未来的研究可以考虑对需求的价格弹性进行估计，然后得到碳价格。碳排放权不需要实物交割，具有金融属性，为确保透明度，需要建立可信的分布式交易环境。同时，微电网碳交易机制往往忽视电力灵活交易的特点，需要通过建立电力与碳排放权联合交易的市场机制和调度方法，挖掘用户侧降碳潜力，激励能量利用低碳方式。因此，如何借助区块链、智能合约等智能技术，基于 P2P 交易、货币激励等市场机制设计包含电力和碳排放权的分布式交易框架将是未来研究的重点方向。此外，以年为单位结算的碳交易机制能否向月、日等多时间尺度结算方式过渡，从而解决碳排放超标、配额不匹配的问题也是今后研究重点。

在人工智能技术改进方面，人工智能技术已经广泛应用于智能微电网优化运行中，但目前人工智能技术在一定程度上暴露出鲁棒差、泛化弱、灾难性遗忘、大规模分布式部署难等问题。在应用过程中也呈现不确定性强、类不完全可见、学习过程重要因素变化大等缺陷，应发展可泛化、可协同、可进化、安全可信的人工智能理论和方法，突破智能微电网优化运行技术的瓶颈，为我国“双碳”的战略目标达成提供理论支撑和示范验证。

5 结论

在全球碳中和的背景下，微电网承担着区域节能减排的重任。微电网智能化、信息化、数据化发展的同时，拓扑结构复杂、资产要素管理困难、运行方式难以追踪等特点也随之暴露，人工智能赋能微电网低碳经济优化技术也需要随之调整以适应现状。本文首先提出人工智能赋能微电网层次架构，关注其在低碳经济目标下的特点及面临挑战。其次总结现有模型与求解方法，分析微电网优化运行原理。再次，总结智能微电网优化运行技术，并初步提出不确定条件下人工智能技术融合的微电网调控技术。最后，对智能微电网优化运行技术进行展望，为未来研究提供方向。

参考文献 References

[1] 任大伟，肖晋宇，侯金鸣，等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术，2022，46(10)：3831-3839.
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.

[2] 彭春华，张金克，陈 露，等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备，2020，40(3)：1-7.
PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7.

[3] GAO K Y, WANG T S, HAN C J, et al. A review of optimization of microgrid operation[J]. Energies, 2021, 14(10): 2842.

[4] 朱晓荣，谢婉莹，鹿国微. 采用区间多目标线性规划法的热电联供型微网日前调度[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2668-2677.
ZHU Xiaorong, XIE Wanying, LU Guowei. Day-ahead scheduling of combined heating and power microgrid with the interval multi-objective linear programming[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2668-2677.

[5] DAWOUD S M, LIN X N, OKBA M I. Hybrid renewable microgrid optimization techniques: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 2039-2052.

[6] AASLID P, KORPÅS M, BELSNES M M, et al. Stochastic optimization of microgrid operation with renewable generation and energy storages[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1481-1491.

[7] 汪 亮，彭勇刚，吴 韬，等. 光储交流微电网孤岛模式下的改进型主从控制[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3530-3540.
WANG Liang, PENG Yonggang, WU Tao, et al. Improved master-slave control for islanded AC microgrid with PV and energy storage systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3530-3540.

[8] 米师农，张建成，郭 伟. 基于改进 FPA 算法的互联微电网优化调度模型[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2849-2856.
MI Shinong, ZHANG Jiancheng, GUO Wei. Optimal scheduling model of interconnected microgrids based on modified FPA algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2849-2856.

[9] 唐 巍，高 峰. 考虑用户满意度的户用型微电网日前优化调度[J]. 高电压技术，2017，43(1)：140-148.
TANG Wei, GAO Feng. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 140-148.

[10] CUI Y, WANG Y J, XU Y, et al. Low-carbon economic dispatching of microgrid considering generalized integrated demand response and nonlinear conditions[J]. Energy Reports, 2023, 9: 1606-1620.

[11] LONG Y L, LI Y, WANG Y H, et al. Low-carbon economic dispatch considering integrated demand response and multistep carbon trading for multi-energy microgrid[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 6218.

[12] 韩 莹，于三川，李荦一，等. 计及阶梯式碳交易的风光氢储微电网低碳经济配置方法[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2523-2533.
HAN Ying, YU Sanchuan, LI Luoyi, et al. Low-carbon and economic configuration method for solar hydrogen storage microgrid including stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2523-2533.

[13] DONG H Y, FU Y B, JIA Q Q, et al. Low carbon optimization of integrated energy microgrid based on life cycle analysis method and multi time scale energy storage[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 60-71.

[14] 朱振山，盛明鼎，陈哲盛. 计及液态空气储能与综合需求响应的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备，2022，42(12)：1-8.
ZHU Zhenshan, SHENG Mingding, CHEN Zhesheng. Low-carbon economic dispatching of integrated energy system considering liquid air energy storage and integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 1-8.

[15] CHUNG I Y, CHEOL-HEEYOO S J O. Distributed intelligent microgrid control using multi-agent systems[J]. Engineering, 2013, 5(1): 1-6.

[16] 周 润，向 月，王 杨，等. 基于智能电表集总数据的家庭电动汽车充电行为非侵入式辨识与负荷预测[J]. 电网技术，2022，46(5)：1897-1906.
ZHOU Run, XIANG Yue, WANG Yang, et al. Non-intrusive identification and load forecasting of household electric vehicle charging behavior based on smart meter data[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1897-1906.

[17] 胡 蓉，魏震波，郭 毅，等. 现货市场下计及用户需求响应弹性差异的微电网优化运营分析[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1393-1402.
HU Rong, WEI Zhenbo, GUO Yi, et al. Analysis of optimal operation of microgrid considering the differences in user demand response elasticity in spot market[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1393-1402.

[18] MOHARM K. State of the art in big data applications in microgrid: a review[J]. Advanced Engineering Informatics, 2019, 42: 100945.

[19] JIANG C D, XIA Z L. Application of a hybrid model of big data and BP network on fault diagnosis strategy for microgrid[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 1554422.

[20] 李 鹏，王 瑞，冀浩然，等. 低碳化智能配电网规划研究与展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(24)：10-21.
LI Peng, WANG Rui, JI Haoran, et al. Research and prospect of planning for low-carbon smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 10-21.

[21] 王 玮，李 睿，姜久春. 面向能源互联网的配电系统规划关键问题研究综述与展望[J]. 高电压技术，2016，42(7)：2028-2036.
WANG Wei, LI Rui, JIAGN Jiuchun. Key issues and research prospects of distribution system planning orienting to energy internet[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2028-2036.

[22] 彭春华，张海洋，孙惠娟，等. 碳交易机制下综合能源市场多供能

主体均衡竞价策略[J]. 电网技术，2022，46(2)：463-471.
PENG Chunhua, ZHANG Haiyang, SUN Huijuan, et al. Balanced bidding strategy for multiple energy suppliers in the integrated energy market under carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 463-471.

[23] 年 珩，孔 亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2241-2254.
NIAN Heng, KONG Liang. Review on fault protection technologies of DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2241-2254.

[24] 刘 洋，高丽霞，刘 璐. 考虑样本不平衡的并行化用户负荷类型辨识方法[J]. 电网技术，2020，44(11)：4310-4317.
LIU Yang, GAO Lixia, LIU Lu. Parallel load type identification algorithm considering sample class imbalance[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4310-4317.

[25] 葛磊蛟，李元良，陈艳波，等. 智能配电网态势感知关键技术及实施效果评价[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2269-2280.
GE Leijiao, LI Yuanliang, CHEN Yanbo, et al. Key technologies of situation awareness and implementation effectiveness evaluation in smart distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2269-2280.

[26] 贾宏杰，王梓博，余晓丹，等. 城市园区微网系统端对端能量交易技术研究现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2453-2468.
JIA Hongjie, WANG Zibo, YU Xiaodan, et al. State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading technology in urban community microgrid system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2453-2468.

[27] 赵鹏杰，吴俊勇，王 燚，等. 基于深度强化学习的微电网优化运行策略[J]. 电力自动化设备，2022，42(11)：9-16.
ZHAO Pengjie, WU Junyong, WANG Yi, et al. Optimal operation strategy of microgrid based on deep reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 9-16.

[28] ZHANG Z N, DU J, FEDOROVICH K S, et al. Optimization strategy for power sharing and low-carbon operation of multi-microgrid IES based on asymmetric nash bargaining[J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 44: 100981.

[29] ZHANG Y F, AI Q, WANG H, et al. Bi-level distributed day-ahead schedule for islanded multi-microgrids in a carbon trading market[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 186: 106412.

[30] 李 坚，吴亮红，张红强，等. 基于排序交叉优化算法的冷热电联供微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(18)：137-145.
LI Jian, WU Lianghong, ZHANG Hongqiang, et al. Microgrid economic dispatch of combined cooling, heating and power based on a rank pair learning crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 137-145.

[31] 赵 峰，罗 鑫，高锋阳. 考虑网内实时电价的微电网经济优化运行研究[J]. 太阳能学报，2020，41(9)：53-60.
ZHAO Feng, LUO Xin, GAO Fengyang. Research on optimal operation for micro-grid considering real-time price[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(9): 53-60.

[32] MANSOUR-SAATLOO A, EBADI R, MIRZAEI M A, et al. Multi-objective IGDT-based scheduling of low-carbon multi-energy microgrids integrated with hydrogen refueling stations and electric vehicle parking lots[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103197.

[33] SHEN Y, HU W, LIU M, et al. Energy storage optimization method for microgrid considering multi-energy coupling demand response[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: DOI 10.1016/J. EST. 2021.103521.

[34] 刘 畅，卓建坤，赵东明，等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(1)：1-18.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.

[35] 杨 健，唐 飞，廖清芬，等. 考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略[J]. 电力自动化设备，2017，37(8)：179-184，200.
YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 179-184, 200.

[36] WANG Y Z, LI Z H, WEN F S, et al. Energy management for an integrated energy system with data centers considering carbon trading[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, Canada: IEEE, 2020: 1-5.

[37] 施泉生，丁建勇，刘 坤，等. 含电、气、热 3 种储能的微网综合能源系统经济优化运行[J]. 电力自动化设备，2019，39(8)：269-276，293.
SHI Quansheng, DING Jianyong, LIU Kun, et al. Economic optimal operation of microgrid integrated energy system with electricity, gas and heat storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 269-276, 293.

[38] 王 磊，姜 涛，宋 丹，等. 基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(8)：151-159.
WANG Lei, JIANG Tao, SONG Dan, et al. Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 151-159.

[39] 丁煜蓉，陈红坤，吴 军，等. 计及综合能效的电-气-热综合能源系统多目标优化调度[J]. 电力系统自动化，2021，45(2)：64-73.
DING Yurong, CHEN Hongkun, WU Jun, et al. Multi-objective optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering comprehensive energy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 64-73.

[40] TORKAN R, ILINCA A, GHORBANZADEH M. A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrids[J]. Renewable Energy, 2022, 197: 852-863.

[41] 陆燕娟，潘庭龙，杨朝辉. 计及电动汽车的社区微网储能容量配置[J]. 太阳能学报，2021，42(12)：362-367.
LU Yanjuan, PAN Tinglong, YANG Chaohui. Energy storage capacity configuration in community microgrid considering electric vehicles[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(12): 362-367.

[42] 董海鹰，褚衍廷，余雨婷. 实时电价理论下含蓄电池的微电网系统运行优化[J]. 太阳能学报，2018，39(10)：2831-2842.
DONG Haiying, CHU Yanting, YU Yuting. Optimal operation of microgrid containing battery under the theory of power spot prices[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2831-2842.

[43] YEH W C, HE M F, HUANG C L, et al. New genetic algorithm for economic dispatch of stand-alone three-modular microgrid in DongAo Island[J]. Applied Energy, 2020, 263: 114508.

[44] VELIK R, NICOLAY P. Grid-price-dependent energy management in microgrids using a modified simulated annealing triple-optimizer[J]. Applied Energy, 2014, 130: 384-395.

[45] HAFEZ A A, ABDELAZIZ A Y, HENDY M A, et al. Optimal sizing of off-line microgrid via hybrid multi-objective simulated annealing particle swarm optimizer[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 94: 107294.

[46] VELIK R, NICOLAY P. Energy management in storage-augmented,

grid-connected prosumer buildings and neighborhoods using a modified simulated annealing optimization[J]. Computers & Operations Research, 2016, 66: 248-257.

[47] 左冠林，郭红霞，林文智，等. 考虑低碳制氢的微电网优化配置[J]. 电力自动化设备，2023，43(2)：9-18.
ZUO Guanlin, GUO Hongxia, LIN Wenzhi, et al. Optimal configuration of microgrid considering low-carbon hydrogen production[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 9-18.

[48] ZHAO X G, ZHANG Z Q, XIE Y M, et al. Economic-environmental dispatch of microgrid based on improved quantum particle swarm optimization[J]. Energy, 2020, 195: 117014.

[49] ZHANG X Z, WANG Z Y, LU Z Y. Multi-objective load dispatch for microgrid with electric vehicles using modified gravitational search and particle swarm optimization algorithm[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118018.

[50] CAO B, DONG W N, LV Z H, et al. Hybrid microgrid many-objective sizing optimization with fuzzy decision[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(11): 2702-2710.

[51] DONG W, YANG Q, FANG X L, et al. Adaptive optimal fuzzy logic based energy management in multi-energy microgrid considering operational uncertainties[J]. Applied Soft Computing, 2021, 98: 106882.

[52] 符 杨，邢馨月，李振坤，等. 基于主从博弈的微电网群多阶段鲁棒优化规划[J]. 电力自动化设备，2022，42(4)：1-8.
FU Yang, XING Xinyue, LI Zhenkun, et al. Multi-stage robust optimization planning of microgrid clusters based on master-slave game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 1-8.

[53] YANG J, SU C Q. Robust optimization of microgrid based on renewable distributed power generation and load demand uncertainty[J]. Energy, 2021, 223: 120043.

[54] 姚 静，方彦军，陈 广. 遗传和禁忌搜索混合算法在机组负荷分配中的应用[J]. 中国电机工程学报，2010，30(26)：95-100.
YAO Jing, FANG Yanjun, CHEN Guang. Genetic-tabu search hybrid algorithm for unit economic load dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(26): 95-100.

[55] QIU J F, CHEN M, WEI Z, et al. Planning and optimal scheduling method of regional integrated energy system based on gray wolf optimizer algorithm[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546: 022059.

[56] FERAHTIA S, REZK H, ABDELKAREEM M A, et al. Optimal techno-economic energy management strategy for building's microgrids based bald eagle search optimization algorithm[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118069.

[57] 孙荣富，张 涛，和 青，等. 风电功率预测关键技术及应用综述[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1129-1143.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, HE Qing, et al. Review on key technologies and applications in wind power forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1129-1143.

[58] ERDEM E, SHI J. ARMA based approaches for forecasting the tuple of wind speed and direction[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1405-1414.

[59] 黄新波，蒋卫涛，朱永灿，等. 基于时间序列和支持向量机的变压器故障预测[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2530-2538.
HUANG Xinbo, JIANG Weitao, ZHU Yongcan, et al. Transformer fault prediction based on time series and support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2530-2538.

[60] ALSHARIF M H, YOUNES M K, KIM J. Time series ARIMA model for prediction of daily and monthly average global solar radiation: The case study of Seoul, South Korea[J]. Symmetry, 2019, 11(2): 240.

[61] ZHAO J, WANG J Z, GUO Z H, et al. Multi-step wind speed forecasting based on numerical simulations and an optimized stochastic ensemble method[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113833.

[62] GOMES P, CASTRO R. Wind speed and wind power forecasting using statistical models: autoregressive moving average (ARMA) and artificial neural networks (ANN)[J]. International Journal of Sustainable Energy Development, 2012, 1(2): 41-50.

[63] SINGH P K, SINGH N, NEGI R. Wind power forecasting using hybrid ARIMA-ANN technique[C]//Ambient Communications and Computer Systems: RACCCS-2018. Singapore: Springer, 2019: 209-220.

[64] CHEN N, SUN H X, ZHANG Q, et al. A short-term wind speed forecasting model based on EMD/CEEMD and ARIMA-SVM algorithms[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6085.

[65] YADAV H K, PAL Y, TRIPATHI M M. Short-term PV power forecasting using empirical mode decomposition in integration with back-propagation neural network[J]. Journal of Information and Optimization Sciences, 2020, 41(1): 25-37.

[66] PATEL D, PATEL S, PATEL P, et al. Solar radiation and solar energy estimation using ANN and Fuzzy logic concept: a comprehensive and systematic study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(22): 32428-32442.

[67] LIU D, NIU D X, WANG H, et al. Short-term wind speed forecasting using wavelet transform and support vector machines optimized by genetic algorithm[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 592-597.

[68] 杨锡运，张艳峰，叶天泽，等. 基于朴素贝叶斯的风电功率组合概率区间预测[J]. 高电压技术，2020，46(3)：1096-1104.
YANG Xiyu, ZHANG Yanfeng, YE Tianze, et al. Prediction of combination probability interval of wind power based on naive bayes[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1096-1104.

[69] 郭玲娟，魏 斌，韩肖清，等. 基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术，2020，46(2)：527-537.
GUO Lingjuan, WEI Bin, HAN Xiaoqing, et al. Capacity optimal configuration of hybrid energy storage in hybrid AC/DC micro-grid based on ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 527-537.

[70] GERAMIFAR H, SHAHABI M, BARFOROSHI T. Coordination of energy storage systems and DR resources for optimal scheduling of microgrids under uncertainties[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(2): 378-388.

[71] ZHANG Y, WANG R, ZHANG T, et al. Model predictive control-based operation management for a residential microgrid with considering forecast uncertainties and demand response strategies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(10): 2367-2378.

[72] 刘敦楠，徐尔丰，许小峰. 面向园区微网的“源−网−荷−储”一体化运营模式[J]. 电网技术，2018，42(3)：681-689.
LIU Dunna, XU Erfen, XU Xiaofeng. "Source-network-load-storage" integrated operation model for microgrid in park[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 681-689.

[73] LI P, ZHENG M M. Multi-objective optimal operation of hybrid AC/DC microgrid considering source-network-load coordination[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1229-1240.

[74] MAH A X Y, HO W S, HASSIM M H, et al. Optimization of photovoltaic-based microgrid with hybrid energy storage: a P-graph approach[J]. Energy, 2021, 233: 121088.

[75] ZIA M F, ELBOUCHIKHI E, BENBOUZID M. Microgrids energy management systems: a critical review on methods, solutions, and

prospects[J]. Applied Energy, 2018, 222: 1033-1055.

[76] BOGLOU V, KARAVAS C S, ARVANITIS K, et al. A fuzzy energy management strategy for the coordination of electric vehicle charging in low voltage distribution grids[J]. Energies, 2020, 13(14): 3709.

[77] AL-SAKKAF S, KASSAS M, KHALID M, et al. An energy management system for residential autonomous DC microgrid using optimized fuzzy logic controller considering economic dispatch[J]. Energies, 2019, 12(8): 1457.

[78] BOGLOU V, KARAVAS C S, KARLIS A, et al. An intelligent decentralized energy management strategy for the optimal electric vehicles' charging in low‐voltage islanded microgrids[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(3): 2988-3016.

[79] KANG K M, CHOI B Y, LEE H, et al. Energy management method of hybrid AC/DC microgrid using artificial neural network[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1939.

[80] 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.

[81] ROY K, MANDAL K K, MANDAL A C. Ant-lion optimizer algorithm and recurrent neural network for energy management of micro grid connected system[J]. Energy, 2019, 167: 402-416.

[82] ROY K, MANDAL K K, MANDAL A C, et al. Analysis of energy management in micro grid—a hybrid BFOA and ANN approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 4296-4308.

[83] AZEROUAL M, LAMHAMDI T, EL MOUSSAOUI H, et al. Simulation tools for a smart grid and energy management for microgrid with wind power using multi-agent system[J]. Wind Engineering, 2020, 44(6): 661-672.

[84] KHAN M R B, JIDIN R, PASUPULETI J. Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 112: 288-307.

[85] ELGAMAL M, KOROVKIN N, ELMITWALLY A, et al. Robust multi-agent system for efficient online energy management and security enforcement in a grid-connected microgrid with hybrid resources[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(9): 1726-1737.

[86] FANG X H, ZHAO Q, WANG J K, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for distributed energy management and strategy optimization of microgrid market[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103163.

[87] 黎海涛，申保晨，杨艳红，等. 基于改进竞争深度 Q 网络算法的微电网能量管理与优化策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(7)：42-49.
LI Haitao, SHEN Baochen, YANG Yanhong, et al. Energy management and optimization strategy for microgrid based on improved dueling deep q network algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 42-49.

[88] 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.

[89] SANG J S, SUN H B, KOU L. Deep reinforcement learning microgrid optimization strategy considering priority flexible demand side[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2256.

[90] 梁　宏，李鸿鑫，张华赢，等. 基于深度强化学习的微网储能系统控制策略研究[J]. 电网技术，2021，45(10)：3869-3876.
LIANG Hong, LI Hongxin, ZHANG Huaying, et al. Control strategy of microgrid energy storage system based on deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3869-3876.

[91] SHANG Y W, WU W C, GUO J B, et al. Stochastic dispatch of energy storage in microgrids: an augmented reinforcement learning approach[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114423.

[92] 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.

[93] 葛少云，程雪颖，刘　洪，等. 园区多微网 P2P 电-碳耦合交易市场设计[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1341-1349.
GE Shaoyun, CHENG Xueying, LIU Hong, et al. Market design of P2P electricity carbon coupling transaction among multi-microgrids in a zone[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1341-1349.

[94] WANG N, XU W S, XU Z Y, et al. Peer-to-peer energy trading among microgrids with multidimensional willingness[J]. Energies, 2018, 11(12): 3312.

[95] WANG L H, ZHANG Y M, SONG W, et al. Stochastic cooperative bidding strategy for multiple microgrids with peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1447-1457.

[96] 周步祥，曹　强，臧天磊，等. 基于区块链的微电网双层博弈电力交易优化决策[J]. 电力自动化设备，2022，42(9)：35-42.
ZHOU Buxiang, CAO Qiang, ZANG Tianlei, et al. Electricity trading optimization decision for microgrid based onblockchain and two-level game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 35-42.

[97] 郭　威，杨　鹏，张　凯，等. 基于区块链的微电网群电力交易方法[J]. 高电压技术，2021，47(11)：3810-3818.
GUO Wei, YANG Peng, ZHAGN Kai, et al. Power transaction method of microgrid group based on blockchain[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3810-3818.

[98] 马　腾，刘　洋，许立雄，等. 基于区块链的配电侧多微电网电能去中心化交易模型[J]. 电网技术，2021，45(6)：2237-2245.
MA Teng, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Energy decentralized transaction model of multi-microgrid in distribution side based on blockchain[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2237-2245.

[99] XU Z X, WANG Y F, DONG R, et al. Research on multi-microgrid power transaction process based on blockchain Technology[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108649.

[100] 戴　赛，李宇轩，孙志祥，等. 分布式储能线上共享优化匹配交易模式[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2515-2522.
DAI Sai, LI Yuxuan, SUN Zhixiang, et al. Online sharing optimization matching transaction mode for distributed energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2515-2522.

[101] 李超杰，余星火，刘　念，等. 博弈论视角的多微电网能源交易框架[J]. 南方电网技术，2017，11(10)：96-102.
LI Chaojie, YU Xinghuo, LIU Nian, et al. Multi-microgrid based energy trading framework from game theoretic perspective[J]. Southern Power system Technology, 2017, 11(10): 96-102.

[102] 刘志坚，刘瑞光，梁　宁，等. 一种基于博弈论的多微网能源交易方法[J]. 电网技术，2021，45(2)：587-595.
LIU Zhijian, LIU Ruiguang, LIANG Ning, et al. Energy trading method of multi-microgrids based on game theory[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 587-595.

[103] 帅轩越，王秀丽，原晟淇，等. 电力市场环境下基于改进纳什议价方法的多微网能源交易机制设计[J]. 西安交通大学学报，2021，55(11)：97-105.
SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, YUAN Shengqi, et al. Design of multi-microgrid energy trading mechanism based on improved Nash

bargaining method in electricity market environment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(11): 97-105.

[104] 芮　涛，李国丽，王群京，等. 配电侧多微电网日前电能交易纳什议价方法[J]. 电网技术，2019，43(7)：2576-2585.
RUI Tao, LI Guoli, WANG Qunjing, et al. Nash bargaining method for multi-microgrid energy trading in distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2576-2585.

[105] JANI A, JADID S. Two-stage energy scheduling framework for multi-microgrid system in market environment[J]. Applied Energy, 2023, 336: 120683.

[106] JIANG Y N, ZHOU K L, LU X H, et al. Electricity trading pricing among prosumers with game theory-based model in energy blockchain environment[J]. Applied Energy, 2020, 271: 115239.

[107] YU Y, LI G L, LI Z Q. A game theoretical pricing mechanism for multi-microgrid energy trading considering electric vehicles uncertainty[J]. IEEE Access, 2020, 8: 156519-156529.

[108] 刘　念，赵　璟，王　杰，等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. 电工技术学报，2018，33(8)：1903-1910.
LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1903-1910.

[109] TAN M, ZHOU Y Q, WANG L, et al. Fair-efficient energy trading for microgrid cluster in an active distribution network[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021, 26: 100453.

[110] DU Y, LI F X, KOU X, et al. Coordinating multi-microgrid operation within distribution system: a cooperative game approach[C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2017: 1-5.

[111] 丁　曦，张笑演，王胜寒，等. 双碳目标下考虑最优建设时序的区域综合能源系统低碳规划[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2584-2596.
DING Xi, ZHANG Xiaoyan, WANG Shenghan, et al. Low-carbon planning of regional integrated energy system considering optimal construction timing under dual carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2584-2596.

[112] GOH H H, SHI S W, LIANG X, et al. Optimal energy scheduling of grid-connected microgrids with demand side response considering uncertainty[J]. Applied Energy, 2022, 327: 120094.

[113] 乔学博，杨志祥，李　勇，等. 计及两级碳交易和需求响应的多微网合作运行优化策略[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2573-2583.
QIAO Xuebo, YANG Zhixiang, LI Yong, et al. Optimization strategy for cooperative operation of multi-microgrids considering two-level carbon trading and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2573-2583.

[114] XU J Z, YI Y Q. Multi-microgrid low-carbon economy operation strategy considering both source and load uncertainty: a Nash bargaining approach[J]. Energy, 2023, 263: 125712.

[115] GE L J, DU T S, LI C L, et al. Virtual collection for distributed photovoltaic data: challenges, methodologies, and applications[J]. Energies, 2022, 15(23): 8783.



葛磊蛟(通信作者)
1984—，男，博士，副教授
主要从事智能配电网态势感知、新能源并网优化控制和智能配用电大数据云计算技术方面的研究
E-mail: legendglj99@tju.edu.cn

GE Leijiao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



范延赫
2000—，男，硕士生
主要从事智能配电网、综合能源系统方面的研究
E-mail: asd456177300@126.com

FAN Yanhe



来金钢
1985—，男，博士，教授
主要从事微电网群智能控制与优化方面的研究
E-mail: hnyskk@foxmail.com

LAI Jingang
Ph.D., Professor



孙永辉
1980—，男，博士，教授
主要从事新能源电力系统建模与优化控制、能源大数据与人工智能技术方面的研究
E-mail: sunyonghui68@gmail.com

SUN Yonghui
Ph.D., Professor



张彦涛
1978—，男，博士，教授级高工
主要从事新型电力系统优化规划设计方面的研究
E-mail: ytzhang@epri.sgcc.com.cn

ZHANG Yantao
Ph.D., Professor

收稿日期　2023-03-20　修回日期　2023-04-27　　编辑　程子丰