第 49 卷 第 6 期：2239-2252 高电压技术 Vol.49, No.6: 2239-2252
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230392

人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望

孙永辉[1]，孟雲帆[1]，葛磊蛟[2]，张彦涛[3]，王　森[1]，王建喜[1]
（1. 河海大学能源与电气学院，南京 210098；2. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；
3. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100092）

摘　要：为深化能源改革和推进“双碳”战略目标，我国提出以构建新型电力系统作为关键行径。《“十四五”现代能源体系规划》提出积极发展智能微电网，以创新电网结构形态和运行模式，推进构建新型电力系统，人工智能是实现微电网运行优化的重要赋能技术。因此，对人工智能赋能微电网运行优化的应用与理论进行深入分析，并对人工智能技术在微电网运行优化中的应用现状、瓶颈及发展趋势展开分析、总结和展望。提出以数字孪生为主要支撑框架的人工智能赋能智慧微电网的应用体系，深度总结功能要素、运行方式和人工智能赋能作用，展望人工智能赋能微电网运行优化的应用前景，为未来人工智能技术与新型电力系统的深度融合应用提供参考和启示。
关键词：人工智能；微电网运行优化；数字孪生；瓶颈分析；技术趋势；应用展望

Application and Prospect of Microgrid Operation Optimization Enabled by Artificial Intelligence

SUN Yonghui[1], MENG Yunfan[1], GE Leijiao[2], ZHANG Yantao[3], WANG Sen[1], WANG Jianxi[1]
(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100092, China)

Abstract: Building a new type of power system is crucial for China to achieve energy reform and the strategic goal of “carbon peaking and carbon neutrality”. Smart microgrids development, grid structure, operational mode innovation, and a new type of power system construction are proposed in the “14th Five-Year Plan for Renewable Energy Development”. Artificial intelligence is an essential enabling technology to optimize microgrid operation. In this paper, the application and theories of artificial intelligence-enabled microgrid operation optimization are analyzed in detail. The application status, bottlenecks, and development trends of the involved artificial intelligence are analyzed and summarized. Then an application system of artificial intelligence enabling smart microgrids with the digital twin as the main supporting framework is proposed. Functional elements, operation mode, and artificial intelligence effects are comprehensively summarized. Finally, the application prospect of artificial intelligence-enabled microgrid operation optimization is described. It is expected to provide references and inspiration for the deep integration of artificial intelligence and new power systems in the future.
Key words: artificial intelligence; microgrid operation optimization; digital twin; bottleneck analysis; technology trend; application prospect

0　引言

在 2020 年 9 月召开的联合国大会一般性辩论上，习近平总书记提出“3060”的“双碳”目标，即中国的碳排放量在 2030 年前达到峰值，在 2060 年前实现碳的相对零排放[1]。据统计，2021 年我国碳排放量超过 110 亿 t，能源活动碳排放量接近总量的 90%，其中超过 50%产自电力行业[2]。为推进“双碳”目标的实现，我国明确了能源电力碳达峰、碳中和的核心是电力系统，并提出了更高的发展要求[3-5]。2021 年中央财经委员会第九次会议提出“双碳”目标下的新型电力系统需要以新能源为能源供应主体，逐步替代传统的化石高碳能源[6]。

新型电力系统是基于可再生能源，结合骨干电网与分布式电源，以及主干电网、局部配网和微电网的可持续综合能源电力发展模式[4]。微电网作为小型发配用电系统，是新型电力系统的重要成分，既可以通过与外部电网相连实现并网运行，也可以

基金资助项目：国家自然科学基金(52277118)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277118).

孤立进行离网运行的自治系统，兼具自我控制和自我能量管理的特点。

电力系统作为“双碳”目标的重要参与者，其源网荷储等关键环节的改变面临着新形势和新任务。在新型电力系统发展的深入推进下，微电网作为新型电力系统的重要成分和“双碳”目标的“推动者”，其各环节同样迎来深刻变革：

1）在新型电力系统的范式下，微电网的供给侧由新能源发电主导，电力供给由可控向波动转变，发电能力由确定向随机转变，系统的安全性面临较大挑战，突出表现在系统支撑力度减弱、频率调节能力减弱等方面。

2）可再生能源发电在微电网供给侧的比重升高，加剧了可再生能源发电不确定性对微电网运行的影响，给微电网的调节能力带来了较大挑战，突出表现在微电网由源随荷动的实时平衡向源荷互动的非完全实时平衡转变，由一体化控制的稳定微电网向“集中–分布”协同控制的波动微电网转变[7]。

3）微电网的负荷侧在“双碳”目标的推动下实现持续增长，终端电能快速更新换代[8]的同时需求侧中可响应负荷的比例显著增加，需求侧不确定性、源–荷转换的随机性显著增强，微电网的运行和风险控制面临较大挑战，突出表现在柔性负荷替代刚性负荷、产销兼具型负荷替代纯消费型负荷，行为驱动的需求响应替代计划驱动的需求响应[9]。

4）储能作为电力系统中重要的灵活调节资源，是保证微电网稳定运行的关键技术，以多元化储能的形式因地制宜协调接入微电网的各个环节[10]。但目前储能系统受建设成本、运营成本等经济因素制约，同时在技术上缺乏储能的运行调控机制，另外制度上对储能系统的安全质量强制性标准仍不明确，导致储能技术在微电网中的应用面临较大挑战。

因此，当前微电网在高源–荷不确定性和低灵活性资源的双重影响下，其运行时在多时间尺度、多空间尺度上对电能提出了新的需求，同时微电网的系统复杂性和动态性增加，基于模型和经验的电力系统分析方法难以适用微电网多变的运行方式，需要改变传统的模型驱动方法和人为规划外在物理驱动的平衡驱动模式，发展数据驱动下的微电网运行自适应和自寻优理论，支持改进微电网运行方式和新型电力系统的加速构建。

在解决当前微电网运行中面临的问题时，最优化理论存在以下 3 点重要价值：首先，在微电网运行调度层面，综合源–荷不确定性风险的同时，调节灵活可调资源的工作状态，以最优化某种指标的方式来保障微电网安全稳定的运行和响应负荷需求；其次，在微电网运行规划层面，利用源网荷储协同将微电网中分散自治的新能源发电机组、灵活性火电机组、新型负荷及储能等灵活可调资源，整合成同一时空维度下可控微电网调控的规模化资源，以最优化某种指标的方式来设置各主要设备的装机容量来提升能源的梯次综合利用效率[11]并保障供电的可靠性；另外，随着电力市场发展和电力交易变革，在基于价格引导的前提下[12]，实现微电网的供需平衡。

微电网运行优化的实质是通过不同的优化算法和策略，提升规模化灵活资源的调控潜力，以实现不同的评价指标。常用的评价指标有经济性指标、可靠性指标、环保性指标和社会性指标，通过构建与评价指标相关的目标函数和约束条件，对多个等式和不等式条件下，单目标或者多目标的非线性优化问题进行求解。微电网运行优化需要对大规模的数据和信息进行集合，提取繁杂的系统关联特征，构建包含复杂逻辑关系和要素互联互动的模型[13]。同时，微电网运行优化需要考虑不同优化目标之间的联系以实现多优化目标的协同，需要延伸其基本的方法理论，优化改进传统的算法。上述问题均需要新的技术手段进行支撑和驱动。

近年来，人工智能的迅猛发展为上述问题提供了一种解决思路。人工智能是以机器为载体的智能形式，通过算法构建动态计算环境来摸拟智能过程，并在相应环境中通过计算选择行为使达到目标的成功率最大[14]，本质是探索事物间的潜在逻辑关系，并将事物的逻辑关系和泛化能力转化为信息化载体。人工智能通过模型训练寻找系统参数特征，基于数值和统计理论解析并构建系统模型，然后根据清晰的模型结构与复杂的算法建立端对端快速求解计算的桥梁[15]，这既与微电网的动态性和复杂性相对应，又与微电网源–荷的随机性相对应，同时还与微电网电力电量平衡驱动的实时性相对应。另外，数据驱动的人工智能技术通过发掘海量数据之间的特性与关联，实现能量流和信息流的深度融合[16]，这满足微电网运行在复杂场景下寻优对决策的精读和效率的要求。人工智能的目标是在复杂环境与多体交互中做出最优决策，几乎所有的人工智能问题最终都会转换成对优化问题的求解。因此，从某种

意义上来说，人工智能在本质上是一个寻优过程，与微电网的运行优化可以做到深层次的结合。

综上所述，随着能源结构变革和电力系统改革的发展，高比例分布式能源的渗透提升了微电网结构的复杂性和灵活性，使其具备强非线性和复杂耦合性的特点，也增强了系统中的不确定性。此外，微电网亟需简单、高效和可靠的电力系统应用技术，以应对其智能化的发展趋势。微电网运行优化是以模型构建为基础，以经济性、安全性等为目标，结合优化理论和数值计算，对动态机理进行精确仿真求解，并形成兼备高可靠性、高泛用性和多时效性的微电网高效运行体系。在大量的测量与外部信息数据接入后，传统的解析方法在微电网运行优化中受限，在应对高维、时变和非线性问题时难以得到有效的结果，降低了微电网运行优化的可靠性。人工智能技术为解决上述问题提供了新的路径，成为了助力微电网运行优化的有利措施，是提升微电网运行优化安全性、可靠性和经济性的有效工具。

本文结合微电网运行优化的需求以及人工智能现状和发展趋势，讨论了以下 3 个问题：微电网运行优化为何需要人工智能，微电网运行优化需要怎样的人工智能以及人工智能如何赋能微电网运行优化，为人工智能技术推动微电网变革和电力系统的转型升级提供支撑。

1 人工智能赋能微电网运行优化研究概况

1.1 人工智能技术特点

人工智能技术在人们对“智能”的不同理解下，可以分为传统人工智能技术和现代人工智能技术。传统人工智能技术以符号主义[17]为代表，即通过计算机的逻辑法则摸拟智能行为，如专家系统[18]等。随着新一轮科技革命和产业变革的深入，人工智能进入发展的新阶段，现代人工智能技术以联结主义[19]和行为主义[15]为代表，即通过人脑神经元和神经网络的联结机制、人类外在行为的特征摸拟智能行为，如机器学习、深度学习等。图 1 说明了人工智能技术的发展历程和技术特征。

接下来将对现代人工智能技术中具有代表性的深度学习、强化学习和迁移学习的特点进行简要介绍。

1.1.1 深度学习

深度学习是人工神经网络的深层次研究，其本质是含 3 个或以上层次的深层神经网络，可以通过学习具有多个抽象层析的数据特征，从而实现从环境中获取目标的观测信息，并提供当前环境中的状态信息。传统的浅层神经网络对样本的需求有限，模型在复杂系统中的应用效果较差，而深度学习与其相反，不仅对样本的需求大，还可以实现对复杂函数的近似表述，对输入数据由底层至高层逐层提取数据特征并建立语义的映射关系，具有数据特征自提取的能力[20]。该类方法具有模型复杂度高、样本数据规模需求大、计算环境需求高、数据储存能力需求大、理论层次可解释性差、训练速度低的特点。

1.1.2 强化学习

强化学习通过智能体与环境交互获取状态信息并不断更新改进策略，以获取最大的预期奖励，其本质是对决策问题的处理，即学习到完成目标的最佳策略。强化学习适用于解决需要连续做出决策的序贯决策问题，对样本数据的需求程度较低，它更专注于在线规划，探索未知领域和现有知识之间的平衡，通过智能体与环境信息的持续交互，不断进行试错的反复练习[21]。强化学习无法即时生成反馈，故其具有一定的延时性。

1.1.3 迁移学习

迁移学习是一种机器学习方法，通过寻找学习目标和其他领域的相关性，将其转化为不同领域的对应问题并进行求解[22]。迁移学习对样本数据的需求大，某些应用场景中样本过少无法支撑构建可靠模型，利用迁移学习可以将相关场景中已存在的模型参数迁移到该场景中，指导新模型的构建，从而提高模型的泛化能力。迁移学习的效果主要由源任务和目标任务的关联性决定，两者关联性越大，迁移学习的效果越好。另外，迁移学习对于领域的转换在一定程度上解决了样本的问题，为其他机器学习的样本提供了支撑，特别是对于一些小样本场景中，迁移学习大大降低了样本不足对机器学习的限制。

1.2 微电网运行优化对人工智能的需求

人工智能技术对于出力微电网运行优化问题具有显著优势，可以有效提升在多要素、高复杂度情况下，微电网运行优化调度和微电网运行优化规划的决策能力。当前微电网的运行优化在模型上凸显非线性，在参数上凸显随机性和不确定性。而在人工智能的赋能下，优化理论对多变量、多目标和多约束条件的模型，可以实现自适应变量取值和模型分段凸化线性化，突破模型求解中对协同要素的限制，并且有效提升对复杂优化问题求解的速度，

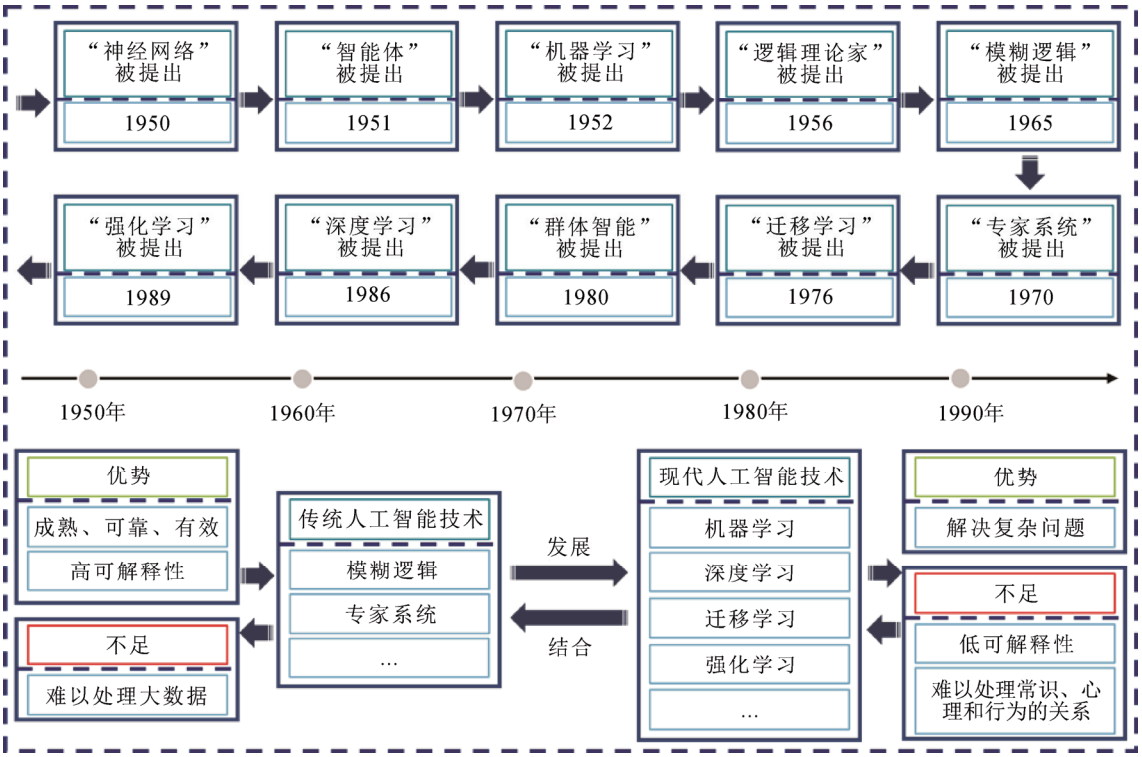


图 1 人工智能技术的发展历程和技术特征图

Fig.1 The history and technical characteristics of artificial intelligence technology

得到更可靠的结论。综上所述，在数据驱动的场景下，人工智能技术利用微电网广域的时空信息，为微电网运行优化提供更强的样本数据处理能力、决策实时更新能力，使多时间维度、多空间维度、多协同要素、多优化目标的微电网运行优化成为可能。图 2 对微电网运行优化技术进行了分析。

1.3 人工智能赋能微电网运行优化的研究现状

微电网的运行优化中主要应用以深度学习为代表的人工智能技术，在微电网运行优化调度方面关注并网运行模式和离网运行模式下优化调度的研究，在微电网运行优化规划方面关注分布式电源容量和储能的容量优化规划的研究，在电力市场方面关注微电网源侧、网侧与负荷侧交易决策的研究。人工智能在微电网运行优化中应用的本质，是寻找系统运行中的多要素的深层逻辑关系，并在数据驱动下提出最优策略，以高效应对系统运行不确定性所带来的影响[23]。

1.3.1 人工智能与微电网运行优化调度

微电网运行优化调度作为能量管理的重要研究内容，通常要协调经济、环境和技术各因素之间的关系，一般以实现微电网运行成本、排放成本、网损成本、停电成本等经济性指标最小化为目标[24]，

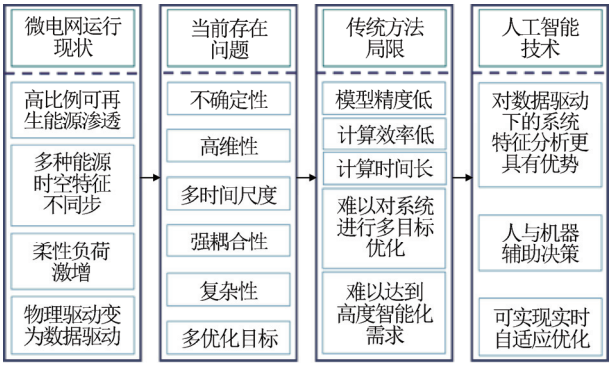


图 2 微电网运行优化技术分析

Fig.2 Analysis of microgrid operation optimization technology

在满足各类运行约束的前提下，最大限度提高可再生能源利用率以及微电网运行的经济性。

1）并网型微电网运行优化调度

并网型微电网与外部电网相连，在外部电网的作用下微电网的电压、频率稳定和功率平衡得到了有效保障。因此，并网型微电网运行优化调度侧重于对多时间维度的分析，以研究微电网日前优化调度和日内优化调度为主。同时，根据对不确定性的考虑程度，上述研究又可以被细分成确定性优化调度和不确定性优化调度。确定性微电网运行优化调

度侧重于在场景和模型上寻找应用创新。文献[25]将储能系统的寿命损耗计入经济调度模型，同时考虑冷热电联供型微电网的经济性和环保性，构建了微电网多目标优化模型，然后根据最大满意度原则将多目标优化模型转化成单目标优化模型，采用改进型遗传算法进行求解。文献[26]考虑了电动汽车对电力系统的影响，构建了考虑电动汽车充放电模型和微电网负荷调度的多目标优化模型，通过结合引力搜索算法和粒子群算法进行求解。对于考虑不确定性的微电网运行优化，通常侧重于研究对不确定变量的建模，摸拟不确定性对微电网运行的影响。文献[27]在建模的时候考虑了可再生能源出力的波动性对微电网稳定运行的影响，以供电可靠性、经济性和环保性为目标构建调度模型，将差分进化引入量子粒子群优化算法中进行求解。文献[28]应用情景分析法描述不确定性信息，经过场景生成和缩减，选择最具代表性的场景，然后在考虑经济性和环保性的基础上构建微电网动态经济调度模型，最后采用差分进化算法进行求解。文献[29]设计了基于模型的强化学习与传统优化算法相结合的框架，大幅提升针对微电网分布式能源出力不确定性在线优化的稳定性。文献[30]针对电动汽车在微电网中的使用，构建了电动汽车的集群充放电模型和多微电网系统的两阶段鲁棒优化调度模型，使用深度学习的框架获得改进的数据驱动的不确定集，实现对系统特征的精准描述。

在多微网系统的研究中，文献[31]提出了基于深度神经网络和无模型强化学习的多微网系统能量管理方法，实现了多微网系统中多目标优化调度。文献[32]提出了基于强化学习的分布式框架，以提高多微电网系统在经济调度中的效率。文献[33]为应对多微网环境中连续和离散动作问题，利用强化学习和迁移学习有效地提升了系统的稳定性并降低了成本，实现了多微网的有功和无功调度。文献[34]考虑可再生能源出力、灵活负荷以及电价不确定性，提出了一种基于Wasserstein距离的模糊集分布式鲁棒优化算法，降低了微电网群的运营成本。文献[35]针对以经济性为目标对微网群的优化调度问题，提出了基于人工神经网络的二进制粒子群优化算法，提升了决策的精确性与效率。

2）离网型微电网运行优化调度

离网型微电网没有外部电网的保障，源–荷不确定性严重威胁系统运行的可靠性、安全性和经济性，分布式可再生能源的出力和负荷波动极大地影响到系统电压、频率稳定和功率平衡。因此，离网型微电网运行优化调度通常以上述 3 个指标为目标，在时间维度上选择日前、日内和实时相结合的形式展开研究。文献[36]协调了经济、环境和用户的角度，提出了储能和用户体验的离网型微电网多目标动态优化调度模型，采用智能进化算法进行求解。文献[37]提出了一种基于机器学习和云边计算的数据驱动的框架，解决考虑源–荷不确定性的孤岛微电网经济能源优化调度问题。文献[38]同时考虑了离网型微电网中的不确定性和需求响应，构造了基于数据驱动的离网型微电网两阶段日前调度模型，利用极限学习机对可再生能源出力和弃电、负荷大小和损失进行预测，然后采用多目标粒子群优化算法求解。文献[39]考虑离网型微电网中可再生能源出力和负荷不确定性，在保证供需平衡的前提下以经济性最优为目标构建了柴油发电机组的优化调度模型，提出了一种基于强化学习的优化算法对模型进行求解。文献[40]针对离网型微电网群提出了分布式模型预测控制的能量调度问题，以可靠性为目标构建了考虑储能系统退化的优化调度模型，利用人工智能算法进行求解。

1.3.2 人工智能与微电网运行优化规划

微电网的优化规划问题是微电网设计阶段需要解决的核心问题之一，其主要目的在于，在充分预测未来分布式可再生能源资源和负荷需求的情况的前提下，以多种量化指标为目标，实现对微电网结构中各部分容量的优化配置。

1）微电网分布式电源容量优化规划

关于微电网分布式电源容量优化规划的研究中，现阶段大量研究集中在建立考虑可再生能源发电不确定性的多目标优化规划模型。文献[41]充分考虑可再生能源发电的不确定性，利用深度卷积生成的对抗神经网络和改进的 k-medoids 算法生成场景表征可再生能源发电，开发了同时考虑经济性和环保性的并网微电网最优容量规划模型。文献[42]考虑了可再生能源的不确定性，同时考虑了从长期角度微电网对满足新能源发电出力波动的需求，以经济性和供电可靠性为指标对离网型微电网进行容量优化规划，最后采用新的智能优化算法进行求解。文献[43]在考虑了微电网运行中源–荷不确定性的同时，另外考虑了市场的不确定性，在此基础上开发了以经济性和环保性为指标的模糊多目标规划模

型，并采用遗传算法求解。

在多微网系统的研究中，文献[44]考虑了可再生能源发电的不确定性，提出了一种多微电网系统的容量优化规划模型，并采用帝国主义竞争算法进行求解。文献[45]基于博弈论技术，以单微网的经济性和多微网集群的经济性为目标，构建了并网型集群微电网的容量优化规划模型，采用粒子群算法求解。文献[46]考虑了微电网中可再生能源出力的不确定性，构建了以经济性为目标的微网群双层博弈模型，得到了多微网系统中各部分组成的最优容量分配。

2）微电网储能容量优化规划

由于源–荷不确定性，储能元件在微电网中的应用通常需要同时兼具高功率密度和高能量密度，单一的储能元件无法同时满足需求，而混合储能系统，以超级电容和蓄电池的组合为例，可以有效实现不同储能元件之间的优势互补，因此，现阶段大量研究集中在建立考虑可再生能源发电不确定和需求响应的混合储能系统多目标优化规划模型。文献[47]考虑了源–荷不确定性，以可靠性为目标，构建了微电网中超级电容和蓄电池组成的混合储能系统的容量优化规划模型，采用了基于人工蜂群的智能算法求解。文献[48]提出了一种基于实时价格需求响应的，以电池和超级电容器容量为目标的、柔性离网型微电网混合储能系统容量多目标优化规划模型，采用遗传算法和改进的偏好技术获取最优解。文献[49]考虑了超级电容器和电池充放电过程对混合储能系统寿命的影响，引入了混合储能系统惩罚成本函数和超级电容器充电状态调节概念，构建了以混合储能系统总投资成本和惩罚成本最小化为目标的混合储能系统容量优化规划模型，采用多目标遗传算法求解。

1.3.3 人工智能与电力市场

随着电力市场改革的深化，微电网运行优化问题的复杂性逐步提升[50-52]，微电网的源网荷储各部分都可以参与不同的电力市场获利，而人工智能技术对于解决随之产生的决策问题发挥了重要作用，主要体现在微电网源侧、网侧和负荷侧的电力市场交易决策方面。

1）源侧电力市场

源侧电力市场的研究集中于分布式可再生能源发电在考虑边际电价和机会成本下，参与电力现货市场和辅助服务市场以获取经济性最优的决策优化问题。文献[53]针对并网型微电网构建了不同类型发电单元的报价和投标模型，以最优化微电网运行经济性为目的，开发混合随机稳健优化框架来处理微电网运行中的不确定性，并利用人工智能算法进行求解。文献[54]研究了微电网中的虚拟电厂在日前市场中的最优投标和调度问题，开发了考虑不当行为风险的随机动态规划模型，提出基于鲁棒纳什均衡的分布式鲁棒多智能体–深度确定性策略梯度算法求解模型。文献[55]提出了一种随机规划算法，在实时电力市场的条件下，考虑微电网运行不确定性，利用博弈论的方法优化微电网群中不同可再生能源运行。

2）网侧电力市场

网侧电力市场中的能量供需管理问题是当前的研究热点。文献[56]提出了微电网和电力市场的交易框架来促进微电网中灵活性资源的利用，研究了配电网运营商通过调度多微网的运行和确定不平衡电价来实现局部能量平衡，将配电网和多微网系统的电力交易决策问题表述为Stackelberg博弈问题并进行求解。文献[57]研究了网侧潮流与微电网电力交易策略的联系，构建了以经济性为目标的基于配电网和微电网交易的主从博弈模型。文献[58]利用了强化学习和博弈思想结合的方法，对所构建的以经济性为目标的微电网群能量管理优化模型进行求解，为解决考虑不确定性的微电网运行提供了新的路径。文献[59]同样考虑了可再生能源发电和需求侧的不确定性，构建了多微网系统的优化模型，利用基于强化学习的优化算法对模型求解，寻找多区域互联的微电网群之间最优的能量管理和交易策略。

3）负荷侧电力市场

负荷侧电力市场则以需求响应为主，在电价变化过程中，通过优化、预测以及用户互动保证微电网运行的可靠性、经济性。文献[60]提出了一种基于强化学习的微电网能源交易方案，通过对未来可再生能源出力和负荷侧需求的预测制定不同的交易策略，解决微电网运行中供需不平衡问题。文献[61]考虑了需求响应和潮流约束，提出了并网型微电网最优调度的3层随机能量管理框架，利用基于群体智能的算法进行求解。文献[62]提出了基于风险的混合能源管理框架，构建基于非概率性决策理论的优化模型，利用改进的粒子群优化算法求解，寻找日前电力市场条件下并网型微电网的最优交易策略。

综上所述，人工智能赋能微电网运行优化可以从模型层面和算法层面进行认识。模型层面，人工智能利用基于神经网络的深度学习表达微电网在多时间维度和多空间维度上的系统运行特征[63]，在数据驱动下深度发掘系统各要素的联系和逻辑关系，实现对微电网运行优化的精准动态模型构建。算法方面，通过灵活运用人工智能模型训练及迭代趋优，为考虑不确定性的微电网运行优化调度和优化规划提供关键技术支撑，如不确定性分析和优化模型求解，提升微电网运行优化策略的可靠性，并得到高收敛性、高准确性和低计算负担的全局最优解。

2 人工智能赋能微电网运行优化的创新路径

微电网中大量接入的柔性单元不仅提升了系统结构的复杂性，也对系统运行的精确建模提出了挑战，仅靠构建随机性好的学习环境和提出交互式学习的指导形式难以实现对微电网运行信息的完整学习。同时，决策信息维度的激增也增加了求解微电网运行优化问题的难度。因此，需要针对性地研究人工智能技术的应用瓶颈，寻找其在微电网运行优化的技术突破。

2.1 人工智能赋能微电网运行优化应用瓶颈

尽管人工智能在处理微电网运行优化的动态模型构建、复杂优化算法求解等问题上具备良好的性能，但是人工智能技术在微电网运行优化中的应用仍受其自身理论和应用方面的局限性约束。人工智能技术通过训练计算机学习人类的行为实现对人类智能行为的摸拟，同时其融合了诸多学科，并在诸多领域取得了显著成果，具有相当多的优越性和先进性[64]。虽然人工智能技术具备高精准度的特点，但是在其应用的过程中仍会存在偏离预期的失准现象[65]。造成这种问题的原因是人工智能技术的“黑盒”效应，即在机器学习(深度学习/神经网络)中，算法无法验证特定输入和特定输出之间的关系，造成了重要决策的可解释性低且与其强功能性无法兼容，对此类预训练模型的大规模应用会带来不容忽视的潜在风险。发展安全可靠的人工智能技术是其在工程应用的前提。随着技术的进步，打开人工智能技术的“黑盒”需要考虑以下 2 个方面：首先，需要充分发掘“黑盒”模型的性能上限，实现对其功能性的拓展。其次，需要充分总结“黑盒”模型的运行规律，实现对其可解释性的拓展。人工智能技术的功能性和可解释性作为人工智能技术可靠性的重要评价指标，二者的平衡和共同发展加速了人工智能技术的工程应用。

随着人工智能技术在电力系统中的研究和应用的深入，人工智能的相关理论、技术和方法与电力系统的物理规律、技术和知识融合形成电力人工智能，针对新型电力系统的高随机性、强耦合性和多时间尺度的特点，利用人工智能技术和电力领域专业知识相结合形成针对性的解决方案[15]。在电力人工智能延伸到微电网运行优化的过程中，突破理论瓶颈对人工智能技术的限制，结合微电网运行特点，构建可以充分施展人工智能技术的支持框架是未来研究重点之一。

从模型层面来看，人工智能技术在微电网运行优化中的应用研究首先应该保障数据信息的对称性、规范性、完整性和有效性。数据驱动下的人工智能需要大量的数据信息实现对计算机的训练，但是大量数据无法完全保证信息的完整性，或多或少会存在一定的特征缺失。虽然可以通过统计、拟合等手段对数据进行处理[66-67]，但“黑盒”模型中的不确定性也因此增加，降低了人工智能技术的可解释性。对微电网运行优化的研究中，人工智能对于系统运行动态信息的提取常常基于经验和常识，同时对于输入信息的完整性、有效性无法进行评估和验证。其次，人工智能技术在微电网运行优化中的应用研究应该以实现高复杂度的应用需求为核心目标。随着电力系统由单一系统向着协同系统发展，微电网结构的复杂性随之增加。同时，随着分布式协同互动和多智能体技术的发展，微电网需求的多样性随之增加。在不考虑算法理论局限的前提下，增强模型的深度特征提取能力，实现在复杂系统和多样需求导致的高维空间下的信息精简和提炼，是支撑人工智能技术在线应用和更新的前提，同时也是支撑人工智能技术突破泛化瓶颈的前提。

从算法层面来看，人工智能技术在微电网运行优化中的应用研究的重点是理论方面的突破。微电网运行中，以分布式新能源发电和负荷的不确定性为代表的非稳定要素造成协同策略在不同环境下的迁移失效，也使得基于期望的值函数失去意义。其主要原因有 2 点：首先在不确定性的影响下决策对系统运行状态信息变化的表征能力有所下降；其次，微电网运行中的多样性和源–荷不确定性严重影响多目标评价体系下最优策略的稳定求解，造成复杂多模式泛化与多评价标准的冲突。

综上所述，人工智能技术在微电网运行优化中的应用仍有提升空间，亟需从理论和应用 2 个方向推进并突破瓶颈。在理论方面需要提升人工智能技术可解释性、功能性和可靠性，在应用方面需要创新研究模式，将工程经验、数据与人工智能技术深度融合。

2.2 人工智能赋能微电网运行优化应用趋势

本质上，人工智能技术赋能微电网运行优化的应用瓶颈与技术理论的局限一致，只有将先进的人工智能模型和算法应用到微电网运行优化的场景中，才可以真正实现系统模式革新和应用瓶颈突破。本文梳理了人工智能前沿技术研究，为微电网运行优化的创新路径提供了 3 个方向。

1）推进泛化性研究

人工智能的泛化性研究是指提高模型对未知数据的适应能力的研究，其目的是构建能够高效地在微电网动态运行和不确定性影响下提取有效信息的模型，并使模型可以实现在系统的多样运行和多种场景中的泛化。现有的研究为避免泛化性难以评估的问题，多采用数据扩增的课程学习方法以实现大规模多任务学习[68]。伴随着元学习[69]、元强化学习[70]的出现，为推进人工智能泛化性研究提供了方案。元学习是新的模型训练范式，旨在发现机器学习任务之外的深层次特征与关联，寻找微电网运行优化的其他指标，使模型在已有知识的基础上快速学习新任务。以元学习为代表的强泛化性技术理论突破，对于考虑不确定性和多优化指标的微电网的运行优化，在其构建适应不同边界条件和不同运行态势的模型过程中提供了重要的技术路径。

2）推进大模型研究

人工智能的大模型[71]又称为基础模型或基石模型，它是预训练模型和强算法结合的新的人工智能模式，即模型在大规模无标注数据集上完成预训练后无需微调，或仅需要少量数据的微调，就可以直接支撑多个不同场景的应用[72]。大模型技术的主要思想是迁移学习，而无监督预训练[73]配合监督学习的微调是实现大模型的通用范式。大模型技术具备高效且充足的模型参数特征提取能力，特别是无监督自映射训练[74]方法为微电网运行优化中多智能体和分布式协同的输入特征层面统一提供了可行的技术路径，可以实现可再生能源发电信息、需求响应信息及储能设备运行信号等多模态数据构成微电网运行优化特征空间，实现对数据的预训练，最终满足实际应用中多优化目标的需求。

3）推进可信性研究

人工智能的“黑盒”属性导致其具有强不可解释性，目前多数研究通过对“黑盒”模型解体并基于参数对模型内部进行分析，以寻找模型潜在的逻辑结构和关系，并实现定性评估[75]。但是仅靠结果论证的方式无法实现对每一次独立模型训练的有效指导，即无法保证模型训练的稳定性。人在回路[76]为推进人工智能可信性的研究提供了新的方案。人在回路利用人和人工智能的协同来构建机器学习模型，通过人与机器学习过程交互来提升机器学习的计算速度和精确度[77]。人工智能中引入人工监督和人机交互可以有效处理现实问题中的不确定性因素，将知识和经验与人工智能的逻辑深度结合，最终得到进化的人工智能技术，实现自在逻辑的因果智能[78]。推进人工智能可信性的研究将从根本上避免了微电网运行优化过程中不合理决策的产生，同时技术上为其提供理论支撑。

2.3 基于数字孪生驱动的人工智能赋能智慧微电网

人工智能赋能微电网运行优化，需要获取微电网中源网荷储各部分的物理信息及运行状态数据，构建高保真的微电网镜像模型，对现实微电网系统实现精准关联，为人工智能技术的模型训练创造条件。数字孪生是针对设备或系统的全生命周期管理，

基于物理模型信息、传感器数据、历史运行数据等，利用多物理量、多尺度、多概率的仿真技术，构建设备或系统的虚拟空间模型，从而反映其全生命周期过程[79-80]。将实体从现实中精确地“克隆”到虚拟的信息化平台上，得到含有实体全部动、静态信息的“数字孪生体”，具备信息和物理空间双向映射的特性。从定义的角度来看，数字孪生技的双向映射特性可以在数据方面满足人工智能技术的需求，同时精准的模型也可以提升人工智能技术的应用效果，是推动人工智能赋能微电网运行优化的重要支撑技术。另外，数字孪生技术能够明显促进人工智能赋能微电网运行优化应用瓶颈的突破：数字孪生技术可以全面精准感知微电网运行中整体和各部分的实时状态，为人工智能技术提供包含完整信息的数据输入，推动人工智能技术的泛化性研究；数字孪生提供的信息和物理空间双向映射，可以促进人工智能技术在训练中的试错和趋优，从而提高决策的稳定性并推进人工智能技术的可信性研究。

智慧微电网是将微电网和智能电网结合的产

物，微电网中的源网荷储各部分在智能电网的数据监控、采集和整合下，经由控制系统实现微电网的运行优化和管理优化[81]。智慧微电网作为多能源融合的复杂系统，其中包含的多智能体系统与数字孪生的天然契合度高，前者关注微电网内部各部分的运行状态，可以实现分布式电源的智能协同和智能自治；后者关注微电网整体的运行机制，可以通过全生命周期的仿真促进数据和模型的交互[82]。智慧微电网和数字孪生技术的结合可以对微电网中各部分组成建立全生命周期的动态记录，促进智慧微电网的数字化发展。

基于三平面理论的数字孪生技术[83]运行流程如图 3 所示，其中物理平面包含现实物理系统，数字平面包含虚拟镜像系统，辅助平面则是物理平面和数字平面的互相作用平面，起到沟通 2 个平面的关键支撑作用。人工智能赋能的面向智慧微电网的数字孪生系统框架如图 4 所示。智慧微电网将全面感知内部源网荷储各部分的物理量、电气量、环境量等，然后将产生的海量数据通过通信网络平台传递，以云计算平台技术[84-85]为平台支撑，以数字孪

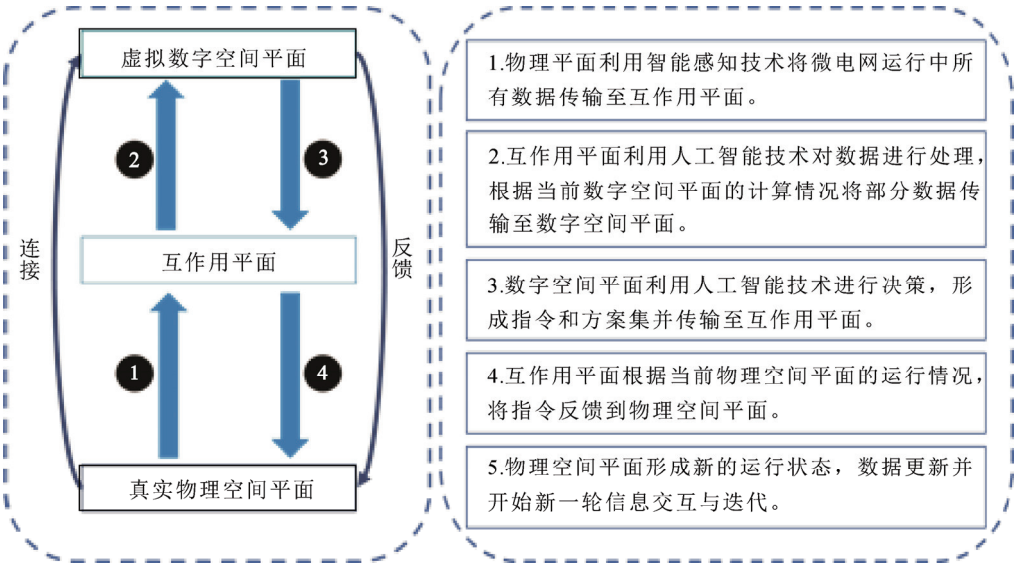


图 3 数字孪生技术运行流程图

Fig.3 Operation flow chart of digital twin technology

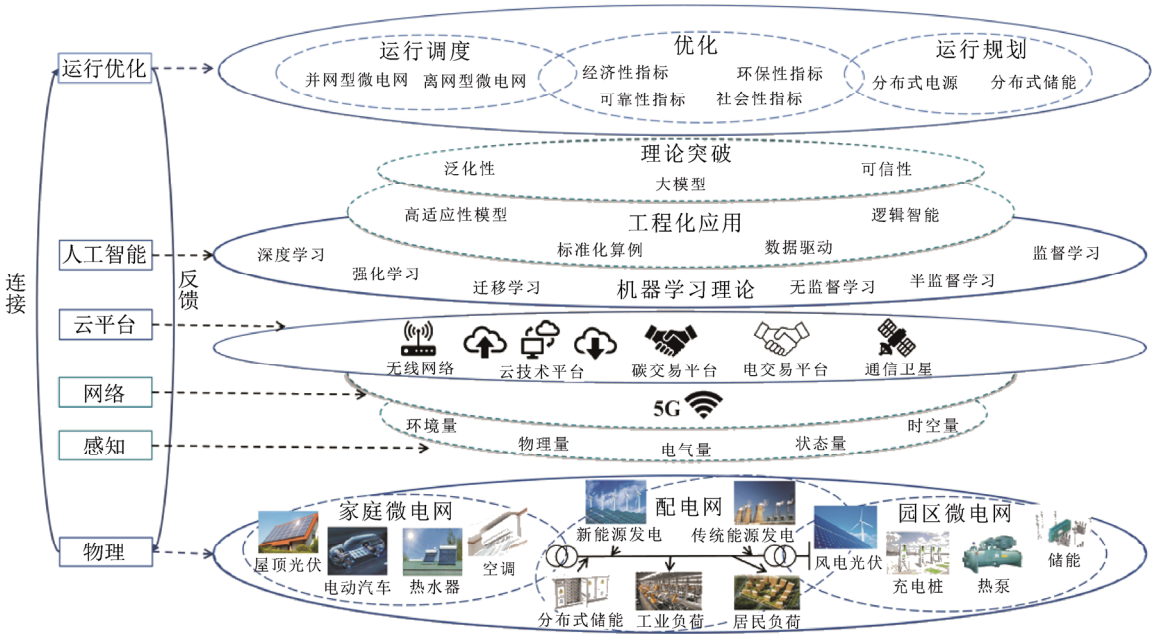


图 4 人工智能赋能微电网运行优化体系架构

Fig.4 Architecture of artificial intelligence for microgrid operation optimization

生技术为载体，以先进人工智能技术为技术支撑，实现对微电网系统精准全面的动态优化和调控。

构建微电网的数字孪生体通常有以下 3 个步骤：

1）模型构建

为了使数字孪生体准确反映微电网的行为，需要根据微电网中各个子系统的物理性质，并结合可用的数据构建精确模型，然后集成所有子系统的模型实现对微电网的数字孪生体建模[86]。常用的模型构建方法有物理模型、数据驱动模型以及混合模型，其中混合模型是指物理和数据驱动的混合建模方法，其被认为是最优的建模方法[87]。

人工智能技术在模型构建过程中应用广泛，比如：系统物理模型的不确定参数会严重影响数字孪生体模型的精度，而利用启发式算法和人工智能算法进行参数识别可以有效解决这类问题[88]；另外，支撑数据驱动模型的大量数据需要导入机器学习引擎中训练神经网络模型，以提高数据驱动模型的精确性[89]。

2）数据采集

构建微电网的数字孪生体需要上传大量的实时监测数据，比如分布式可再生能源发电、线路、储能系统等通过智能电力仪表收集的数据，或者环境数据，如温度、湿度、太阳辐射、风速等数据中心收集的数据。在云平台完成相关数据收集工作后，为了提高数据的质量，需要利用数据分析技术对原始数据进行预处理，人工智能技术对于提升原始数据处理的效率和精度起到了重要作用[90]。

3）模型适配

微电网运行的条件和环境存在一定的不确定性，比如受天气影响而产生的新能源发电出力不确定性和受技术影响而产生的大量柔性负荷的接入，都会产生模型和实际的差异。为了保证数字孪生体和实时模型的精确性和一致性，模型需要根据采集数据的分析结果进行自适应更新。随着人工智能技术的发展，利用机器学习算法或者强化学习等，根据输入数据对模型参数自适应更新的有效技术已经得到了开发和应用[91]。

此外，微电网的数字孪生体采集的大量实时数据不仅可以帮助微电网模型实现自适应更新，也可以提高微电网预测的精准性，进一步提高微电网能源供应的可靠性和经济性。人工智能技术对此应用广泛，比如：基于深度学习的方法是气象参数、新能源出力预测方面的研究热点[92-93]；另外，人工智能模型提升了电力市场价格预测的精确性[94]。

3 结论及展望

以人工智能赋能微电网运行优化，对我国额能源转型的推进、新型电力系统的构建和“双碳”目标的实现有重要价值。本文围绕人工智能赋能微电网运行优化展开分析，可以得出以下结论：

1）微电网运行优化的核心支撑是人工智能技术。人工智能技术能够提升模型对不确定性的表征能力，实现多目标协同下的微电网运行优化动态建模，以及复杂优化问题的高效解析。

2）微电网运行优化需要发展兼具泛化性、可信性的人工智能技术，同时也需要发展大模型技术。考虑到人工智能技术存在的自身理论瓶颈，其在微电网运行优化中的应用仍有发展空间。目前，对人工智能技术的功能性、可解释性、泛化性和大模型等方面的研究趋于热点，将提升人工智能技术在建模和决策方面的能力，并助力人工智能技术突破瓶颈，增强其对微电网运行优化的深度赋能效果。

3）人工智能赋能微电网运行优化的重要支撑体系是数字孪生技术。数字孪生技术通过建立微电网系统在信息空间和物理空间的双向映射，在通信网络的支撑下实现微电网各部分的数据交互和友好互动，为人工智能赋能微电网运行优化提供了重要的支撑体系。

展望未来，人工智能技术在新技术的加持下将会迎来大跨步的发展，其在微电网运行优化中的应用，将持续提高对调度、规划的服务与支撑能力。未来人工智能技术对于微电网运行优化的深度赋能将会经历以下 2 个阶段：第 1 阶段，微电网中可再生能源的比例逐步提升，系统的碳排放显著降低，随着微电网的结构逐步完善，系统运行优化的可靠性目标由安全、稳定转向为稳定、高效，人工智能对微电网运行中各个参与主体进行主动融合，实现多要素之间实时、高效的联动和响应；第 2 阶段，高新能源占比、安全可持续、深度脱碳的微电网体系初步建成，微电网运行中分布式新能源发电和负荷波动所产生的不确定性被基本解决，人工智能可以进行自学习，数字孪生驱动的智慧微电网也在人工智能技术的赋能下成为“电力元宇宙”的重要组成部分，实现开放生态体系下智慧微电网运行的实时优化。

参考文献 References

[1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报，2020(28)：5-7.
XI Jinping. Statement at the general debate of the 75th session of the united nations general assembly[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020(28): 5-7.

[2] 国家气候战略中心. 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报(序言+目录)[EB/OL]. (2020-03-23)[2023-03-15]. http://www.ncsc.org. cn/SY/tjkhybg/202003/t20200323_770094. shtml.
National Climate Strategy Center. The third national information bulletin of the People's Republic of China on climate change[EB/OL]. (2020-03-23)[2023-03-15]. http://www.ncsc.org.cn/SY/tjkhybg/202003/t20200323_770094. shtml.

[3] 郑亚先，杨争林，冯树海，等. 碳达峰目标场景下全国统一电力市场关键问题分析[J]. 电网技术，2022，46(1)：1-19.
ZHENG Yaxian, YANG Zhenglin, FENG Shuhai, et al. Key issue analysis in national unified power market under target scenario of carbon emission peak[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 1-19.

[4] 周孝信，陈树勇，鲁宗相，等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报，2018，38(7)：1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

[5] 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.

[6] 习近平. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议强调推动平台经济规范健康持续发展把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-03-15]. https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315. shtml.
XI Jinping. Xi Jinping presided over the Ninth Meeting of the Central Finance and Economics Commission, emphasizing the promotion of the healthy and sustainable development of the platform economy and the integration of carbon neutrality into the overall layout of ecological civilization construction[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-03-15]. https://news.cctv. com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315. shtml.

[7] 舒印彪，陈国平，贺静波，等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.

[8] 王继业. 构建新型电力系统 推动实现"双碳"目标[R]. 北京：中国电力科学研究院，2021.
WANG Jiye. Building a new power system to promote the realization of "double carbon" target[R]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2021.

[9] 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.

[10] 国家发展改革委，国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《"十四五"新型储能发展实施方案》的通知[EB/OL]. (2022-01-29)[2023-03-15]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310523208. htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on the issuance of the "14th Five-Year Plan" for the implementation of new energy storage development[EB/OL]. (2022-01-29) [2022-03-15]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310523208. htm.

[11] 周 伟，孙永辉，谢东亮，等. 计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J/OL]. 电网技术，2023：1-12[2023-05-18]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst. 2023.0141.
ZHOU Wei, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Low-carbon dispatch of park-level integrated energy system considering the improved ladder-type carbon trading and flexible output of combined heat and power unit[J/OL]. Power System Technology, 2023: 1-12[2023-05-18]. https: //doi. org/10.13335/j. 1000-3673. pst. 2023.0141.

[12] 孙秋野，杨凌霄，张化光. 智慧能源——人工智能技术在电力系统中的应用与展望[J]. 控制与决策，2018，33(5)：938-949.
SUN Qiuye, YANG Lingxiao, ZHANG Huaguang. Smart energy—applications and prospects of artificial intelligence technology in power system[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 938-949.

[13] 王继业. 人工智能赋能源网荷储协同互动的应用及展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(21)：7667-7681.
WANG Jiye. Application and prospect of source-grid-load-storage coordination enabled by artificial intelligence[J]. Proceedings of CSEE, 2022, 42(21): 7667-7681.

[14] KRENN M, POLLICE R, GUO S Y, et al. On scientific understanding with artificial intelligence[J]. Nature Reviews Physics, 2022, 4(12): 761-769.

[15] ZHANG C M, LU Y. Study on artificial intelligence: the state of the art and future prospects[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2021, 23: 100224.

[16] 侯庆春，杜尔顺，田 旭，等. 数据驱动的电力系统运行方式分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：1-12.
HOU Qingchun, DU Ershun, TIAN Xu, et al. Data-driven power system operation mode analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 1-12.

[17] UDRESCU S M, TEGMARK M. AI Feynman: a physics-inspired method for symbolic regression[J]. Science Advances, 2020, 6(16): eaay2631.

[18] SPEISER J L, MILLER M E, TOOZE J, et al. A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 134: 93-101.

[19] SHAO Z, ZHAO R Y, YUAN S, et al. Tracing the evolution of AI in the past decade and forecasting the emerging trends[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 209: 118221.

[20] 张 博，刘 绚，于宗超，等. 基于人工智能的电力系统网络攻击检测研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4413-4426.
ZHANG Bo, LIU Xuan, YU Zongchao, et al. Review on artificial intelligence-based network attack detection in power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4413-4426.

[21] 江昌旭，卢玥君，邵振国，等. 基于图神经网络多智能体强化学习的电力–交通融合网协同优化运行[J/OL]. 高电压技术，2023：1-15[2023-05-18]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20221965.
JIANG Changxu, LU Yuejun, SHAO Zhenguo, et al. Collaborative optimization operation of integrated electric power and traffic network based on graph neural network multi-agent reinforcement learning[J/OL]. High Voltage Engineering, 2023: 1-15[2023-05-18]. https: //doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221965.

[22] 程 凯，彭小圣，徐其友，等. 基于特征选择与多层级深度迁移学习的风电场短期功率预测[J]. 高电压技术，2022，48(2)：497-503.

CHENG Kai, PENG Xiaosheng, XU Qiyou, et al. Short-term wind power prediction based on feature selection and multi-level deep transfer learning[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 497-503.

[23] CHEN X, QU G N, TANG Y J, et al. Reinforcement learning for selective key applications in power systems: recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2935-2958.

[24] NAWAZ A, ZHOU M, WU J, et al. A comprehensive review on energy management, demand response, and coordination schemes utilization in multi-microgrids network[J]. Applied Energy, 2022, 323: 119596.

[25] 孙黎霞，鞠　平，白景涛，等. 计及蓄电池寿命的冷热电联供型微电网多目标经济优化运行[J]. 发电技术，2020，41(1)：64-72.
SUN Lixia, JU Ping, BAI Jingtao, et al. Multi-objective economic optimal operation of microgrid based on combined cooling, heating and power considering battery life[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 64-72.

[26] 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.

[27] 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.

[28] WANG Q, HOU H, XUE M Y, et al. Dynamic economic dispatch of micro-grid based on scenario analysis[C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Beijing, China: IEEE, 2019: 493-499.

[29] SHUAI H, HE H B. Online scheduling of a residential microgrid via Monte-Carlo tree search and a learned model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1073-1087.

[30] TAN B F, CHEN H Y, ZHENG X D, et al. Two-stage robust optimization dispatch for multiple microgrids with electric vehicle loads based on a novel data-driven uncertainty set[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107359.

[31] 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.

[32] DAS A, NI Z, WU D. An efficient distributed reinforcement learning for enhanced multi-microgrid management[C] // 2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Padua, Italy: IEEE, 2022: 1-6.

[33] 巨云涛，陈　希. 基于双层多智能体强化学习的微网群分布式有功无功协调优化调度[J]. 中国电机工程学报，2022，42(23)：8534-8547.
JU Yuntao, CHEN Xi. Distributed active and reactive power coordinated optimal scheduling of networked microgrids based on two-layer multi-agent reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8534-8547.

[34] CAO Y S, LI D M, ZHANG Y H, et al. Optimal energy management for multi-microgrid under a transactive energy framework with distributionally robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 599-612.

[35] ABDOLRASOL M G M, MOHAMED R, HANNAN M A, et al. Artificial neural network based particle swarm optimization for microgrid optimal energy scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12151-12157.

[36] LI Y, YANG Z, ZHAO D B, et al. Incorporating energy storage and user experience in isolated microgrid dispatch using a multi-objective model[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(6): 973-981.

[37] DONG W, YANG Q, LI W, et al. Machine-learning-based real-time economic dispatch in islanding microgrids in a cloud-edge computing environment[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(17): 13703-13711.

[38] HOU H, WANG Q, XIAO Z F, et al. Data-driven economic dispatch for islanded micro-grid considering uncertainty and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107623.

[39] QI J J, LEI L, ZHENG K, et al. Optimal scheduling in IoT-driven smart isolated microgrids based on deep reinforcement learning[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal, 2023: 1-16[2023-05-18]. https: //doi.org/10.1109/JIOT. 2023.3267625.

[40] NAWAZ A, WU J, YE J, et al. Distributed MPC-based energy scheduling for islanded multi-microgrid considering battery degradation and cyclic life deterioration[J]. Applied Energy, 2023, 329: 120168.

[41] CHEN X Q, DONG W, YANG Q. Robust optimal capacity planning of grid-connected microgrid considering energy management under multi-dimensional uncertainties[J]. Applied Energy, 2022, 323: 119642.

[42] BUKAR A L, TAN C W, YIEW L K, et al. A rule-based energy management scheme for long-term optimal capacity planning of grid-independent microgrid optimized by multi-objective grasshopper optimization algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 221: 113161.

[43] LIU Z H, YI Y Q, YANG J H, et al. Optimal planning and operation of dispatchable active power resources for islanded multi-microgrids under decentralised collaborative dispatch framework[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(3): 408-422.

[44] WANG G, WANG Q Q, QIAO Z, et al. Optimal planning of multi-micro grids based-on networks reliability[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1233-1249.

[45] ALI L, MUYEEN S M, BIZHANI H, et al. Optimal planning of clustered microgrid using a technique of cooperative game theory[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 183: 106262.

[46] FANG F, ZHU Z Y, JIN S P, et al. Two-layer game theoretic microgrid capacity optimization considering uncertainty of renewable energy[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 4260-4271.

[47] ZHANG Y, YAN Z, ZHOU C C, et al. Capacity allocation of HESS in micro-grid based on ABC algorithm[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2020, 15(4): 496-505.

[48] LI B, WANG H L, TAN Z K. Capacity optimization of hybrid energy storage system for flexible islanded microgrid based on real-time price-based demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107581.

[49] PREMADASA P N D, CHANDIMA D P. An innovative approach of optimizing size and cost of hybrid energy storage system with state of charge regulation for stand-alone direct current microgrids[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101703.

[50] MANSOURLAKOURAJ M, SHAHABI M, SHAFIE-KHAH M, et al. Optimal market-based operation of microgrid with the integration of wind turbines, energy storage system and demand response resources[J]. Energy, 2022, 239: 122156.

[51] HADDADIPOUR S, AMIR V, JAVADI S. Strategic bidding of a multi-carrier microgrid in energy market[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(3): 634-649.

[52] ZHAO J Y, WANG W, GUO C X. Hierarchical optimal configuration of multi-energy microgrids system considering energy management in electricity market environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108572.

[53] HU B, GONG Y Z, CHUNG C Y, et al. Price-maker bidding and offering strategies for networked microgrids in day-ahead electricity

markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5201-5211.

[54] ZHU Z Q, CHAN K W, XIA S W, et al. Optimal bi-level bidding and dispatching strategy between active distribution network and virtual alliances using distributed robust multi-agent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2833-2843.

[55] HAKIMI S M, HASANKHANI A, SHAFIE-KHAH M, et al. Stochastic planning of a multi-microgrid considering integration of renewable energy resources and real-time electricity market[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117215.

[56] HUA W Q, XIAO H, PEI W, et al. Transactive energy and flexibility provision in multi-microgrids using Stackelberg game[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(2): 505-515.

[57] 游 祥，李华强，陆 杨，等. 考虑配网潮流的多微网集中式交易定价策略[J]. 电网技术，2022，46(4)：1297-1306.
YOU Xiang, LI Huaqiang, LU Yang, et al. Pricing strategy for multi-microgrid centralized trading considering distribution network power flow[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1297-1306.

[58] WANG H W, HUANG T W, LIAO X F, et al. Reinforcement learning in energy trading game among smart microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5109-5119.

[59] LIU S, HAN S Y, ZHU S Y. Reinforcement learning-based energy trading and management of regional interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2047-2059.

[60] LU X Z, XIAO X Y, XIAO L, et al. Reinforcement learning-based microgrid energy trading with a reduced power plant schedule[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10728-10737.

[61] RAGHAV L P, KUMAR R S, RAJU D K, et al. Analytic hierarchy process (AHP)-warm intelligence based flexible demand response management of grid-connected microgrid[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118058.

[62] KIM H J, KIM M K. Risk-based hybrid energy management with developing bidding strategy and advanced demand response of grid-connected microgrid based on stochastic/information gap decision theory[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 131: 107046.

[63] 王铮澄，周艳真，郭庆来，等. 考虑电力系统拓扑变化的消息传递图神经网络暂态稳定评估[J]. 中国电机工程学报，2021，41(7)：2341-2349.
WANG Zhengcheng, ZHOU Yanzhen, GUO Qinglai, et al. Transient stability assessment of power system considering topological change: a message passing neural network-based approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2341-2349.

[64] HONG J W, WANG Y W, LANZ P. Why is artificial intelligence blamed more? analysis of faulting artificial intelligence for self-driving car accidents in experimental settings[J]. International Journal of Human–Computer Interaction, 2020, 36(18): 1768-1774.

[65] DULAC-ARNOLD G, LEVINE N, MANKOWITZ D J, et al. Challenges of real-world reinforcement learning: definitions, benchmarks and analysis[J]. Machine Learning, 2021, 110(9): 2419-2468.

[66] 郑志明，吕金虎，韦 卫，等. 精准智能理论：面向复杂动态对象的人工智能[J]. 中国科学：信息科学，2021，51(4)：678-690.
ZHENG Zhiming, LÜ Jinhu, WEI Wei, et al. Refined intelligence theory: artificial intelligence regarding complex dynamic objects[J]. Chinese Science: Information Science, 2021, 51(4): 678-690.

[67] 蒋胤傑，况 琨，吴 飞. 大数据智能：从数据拟合最优解到博弈对抗均衡解[J]. 智能系统学报，2020，15(1)：175-182.
JIANG Yinjie, KUANG Kun, WU Fei. Big data intelligence: from the optimal solution of data fitting to the equilibrium solution of game theory[J]. Journal of Intelligent Systems, 2020, 15(1): 175-182.

[68] AMIRKHANI A, BARSHOOI A H. Consensus in multi-agent systems: a review[J]. Artificial Intelligence Review, 2022, 55(5): 3897-3935.

[69] HOSPEDALES T, ANTONIOU A, MICAELLI P, et al. Meta-learning in neural networks: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(9): 5149-5169.

[70] WANG J, HU J, MIN G Y, et al. Fast adaptive task offloading in edge computing based on meta reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(1): 242-253.

[71] FEI N Y, LU Z W, GAO Y Z, et al. Towards artificial general intelligence via a multimodal foundation model[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3094.

[72] STRICKLAND E. Andrew Ng, AI minimalist: the machine-learning pioneer says small is the new big[J]. IEEE Spectrum, 2022, 59(4): 22-50.

[73] 薛擎天，李军辉，贡正仙，等. 基于预训练的无监督神经机器翻译模型研究[J]. 计算机工程与科学，2022，44(4)：730-736.
XUE Qingtian, LI Junhui, GONG Zhengxian, et al. Unsupervised neural machine translation model based on pre-training[J]. Computer Engineering and Science, 2022, 44(4): 730-736.

[74] HE K M, FAN H Q, WU Y X, et al. Momentum contrast for unsupervised visual representation learning[C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle, WA, USA: IEEE, 2020: 9729-9738.

[75] MCDERMID J A, JIA Y, PORTER Z, et al. Artificial intelligence explainability: the technical and ethical dimensions[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2021, 379(2207): 20200363.

[76] WU X J, XIAO L W, SUN Y X, et al. A survey of human-in-the-loop for machine learning[J]. Future Generation Computer Systems, 2022, 135: 364-381.

[77] LIU H C, WANG Y Q, FAN W Q, et al. Trustworthy AI: a computational perspective[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2022, 14(1): 4.

[78] ZHENG N N, LIU Z Y, REN P J, et al. Hybrid-augmented intelligence: collaboration and cognition[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(2): 153-179.

[79] SNIJDERS R, PILEGGI P, BROEKHUIJSEN J, et al. Machine learning for digital twins to predict responsiveness of cyber-physical energy systems[C] // 2020 8th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2020: 1-6.

[80] ZHANG G H, HUO C, ZHENG L B, et al. An architecture based on digital twins for smart power distribution system[C]//2020 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD). Chengdu, China: IEEE, 2020: 29-33.

[81] 高 扬，贺 兴，艾 芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术，2021，45(7)：2483-2491.
GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491.

[82] 相晨萌，曾四鸣，闫 鹏，等. 数字孪生技术在电网运行中的典型应用与展望[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1564-1575.
XIANG Chenmeng, ZENG Siming, YAN Peng, et al. Typical application and prospect of digital twin technology in power grid operation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1564-1575.

[83] 蒲天骄，陈 盛，赵 琦，等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2012-2028.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and

application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028.

[84] 赵俊华，文福拴，薛禹胜，等. 云计算：构建未来电力系统的核心计算平台[J]. 电力系统自动化，2010，34(15)：1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cloud computing: implementing an essential computing platform for future power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 1-8.

[85] TALAAT M, ALSAYYARI A S, ALBLAWI A, et al. Hybrid-cloud-based data processing for power system monitoring in smart grids[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102049.

[86] ANDRYUSHKEVICH S K, KOVALYOV S P, NEFEDOV E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling[C]// 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Helsinki, Finland: IEEE, 2019, 1: 1536-1542.

[87] O'DWYER E, PAN I, ACHA S, et al. Smart energy systems for sustainable smart cities: current developments, trends and future directions[J]. Applied Energy, 2019, 237: 581-597.

[88] PENG Y Z, WANG H. Application of digital twin concept in condition monitoring for DC-DC converter[C]// 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019: 2199-2204.

[89] SONG X Y, JIANG T, SCHLEGEL S, et al. Parameter tuning for dynamic digital twins in inverter-dominated distribution grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(5): 811-821.

[90] MIHAI S, YAQOOB M, HUNG D V, et al. Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2255-2291.

[91] PARISI G I, KEMKER R, PART J L, et al. Continual lifelong learning with neural networks: a review[J]. Neural Networks, 2019, 113: 54-71.

[92] SUN Y H, ZHOU Y, WANG S, et al. Nonparametric probabilistic prediction of regional PV outputs based on granule-based clustering and direct optimization programming[J/OL]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023: 1-12[2023-05-18]. https://doi.org/10.35833/ MPCE. 2022.000577.

[93] ALKHAYAT G, MEHMOOD R. A review and taxonomy of wind and solar energy forecasting methods based on deep learning[J]. Energy and AI, 2021, 4: 100060.

[94] ALIABADI D E, CHAN K. The emerging threat of artificial intelligence on competition in liberalized electricity markets: a deep Q-network approach[J]. Applied Energy, 2022, 325: 119813.



孙永辉(通信作者)
1980—，男，博士，教授
主要从事智慧能源系统建模、智慧能源系统规划与优化、能源大数据与人工智能方面的研究
E-mail: meyhsun@139.com

SUN Yonghui
Ph.D., Professor
Corresponding author



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



孟云帆
1996—，男，博士生
主要从事微电网运行优化与控制方面的研究
E-mail: andimeng@hhu.edu.cn

MENG Yunfan
Ph.D. candidate



王　森
1995—，男，博士生
主要从事从事新能源电力系统建模与优化控制的研究
E-mail: senwang@hhu.edu.cn

WANG Sen
Ph.D. candidate



葛磊蛟
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



王建喜
1989—，男，博士生
主要从事综合能源系统的规划和运行优化、优化算法和数据分析方面的研究
E-mail: wjx_em@163.com

WANG Jianxi
Ph.D. candidate

收稿日期　2023-03-17　修回日期　2023-05-18　　编辑　程子丰