

文章编号:1674-7607(2025)12-2207-12

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.250687

AI大模型在能源系统规划的应用潜力及发展展望

方宇娟¹, 吴铮², 仇慧³, 周一帆³, 杨汶瑾³, 刘云川³,
倪金³, 丁田荣³, 王振乾³, 潘弈成³

(1. 清华大学 低碳能源实验室, 北京 100084; 2. 清华大学 碳中和研究院, 北京 100084;
3. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084)

摘要: 能源系统转型规划面临研究对象规模大、关联性复杂导致的数据处理难、高维求解难等挑战, 传统技术难以应对, AI大模型等人工智能技术依托强大的计算和推理能力可为解决该问题提供关键支撑。然而, AI大模型在能源系统规划这一特定交叉学科中的应用探索仍处于初步阶段, 相关研究成果目前尚显薄弱。因此, 通过探讨 AI大模型技术在能源系统规划领域的应用潜力及发展前景, 提出从理论到工程实践的系统性研究与应用框架, 提炼得出规划对象、目标及指标确立、数据研究、需求预测、规划方法设计和结果审定与调整等5项能源系统规划主要任务, 以及相同任务中需选用的不同方法和尺度。此外, 研究了 AI大模型与能源系统规划间的耦合关系, 划分大模型技术种类分析其可发挥作用以适应规划研究, 并分析了 AI大模型在能源系统规划中的研究及应用现状、挑战和空白。本研究可推动 AI大模型以重构能源系统规划的认识框架与决策模式, 有效助力我国双碳目标下能源结构的转型升级与配置优化。

关键词: 大模型; 人工智能; 智能体技术; 能源系统规划; 低碳转型

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **学科分类号:** 470.30

Application Potential and Development Prospects of AI Large Models in Energy System Planning

FANG Yujuan¹, WU Zheng², QIU Hui³, ZHOU Yifan³, YANG Wenjin³, LIU Yunchuan³,
NI Jin³, DING Tianrong³, WANG Zhenqian³, PAN Yicheng³

(1. Low Carbon Energy Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Institute of Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Energy system transition planning face challenges such as difficulties in data processing and high-dimensional solution, which are caused by the large scale of research objects and complex correlations. Traditional technologies are difficult to cope with these challenges, while artificial intelligence (AI) technologies such as AI large models could provide key support for solving this problem by virtue of their strong computing and reasoning capabilities. However, the exploration of applying AI large models in the specific interdisciplinary field of energy system planning is still in its initial stage, and the relevant research results remain relatively weak at present. Therefore, the application potential and development prospects

收稿日期:2025-10-14 修订日期:2025-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207114)

作者简介:方宇娟(1996—),女,湖北天门人,助理研究员,博士,研究方向为能源低碳转型、能源规划、人工智能能源专业大模型,
E-mail:fangyj@mail.tsinghua.edu.cn。

of AI large model technology in the field of energy system planning were discussed, a systematic research and application framework from theory to engineering practice were proposed, and five main tasks of energy system planning were extracted, including planning objects, goals and indicators establishment, data research, demand forecasting, planning method design, and result approval and adjustment, as well as different methods and scales to be selected in the same task. In addition, the coupling relationship between AI large models and energy system planning was studied, the types of large model technologies were divided and their potential roles to adapt to planning research were analyzed. The research and application status, challenges, and gaps of AI large models in energy system planning were analyzed, and the possible research directions and content prospects were discussed. This study can promote the use of AI large models to reconstruct the cognitive framework and decision-making mode of energy system planning, and effectively assist in the transformation, upgrading, and configuration optimization of China's energy structure under the dual carbon goals.

Key words: large model; artificial intelligence; agent technology; energy system planning; low-carbon transition

在全球应对气候变化与促进能源可持续发展的背景下,构建一个清洁低碳、安全高效的新型能源体系已成为我国能源战略的关键目标之一。习近平总书记指出,积极发展清洁能源,推动社会绿色低碳转型,已成为国际社会应对全球气候变化的普遍共识。党的二十大报告围绕积极稳妥推进碳达峰、碳中和,对推动能源清洁低碳高效利用、深入推进能源转型革命等方面作出了一系列战略部署。但是,我国目前以传统化石能源为主的能源系统,仍面临着对国际油气资源高度依赖的困境,难以摆脱“贫油少气”的资源禀赋劣势,而且其高碳特性与实现双碳目标也背道而驰。因此,新型能源体系的建设任务十分紧迫,它不仅有助于减少碳排放、提高能源安全,还能促进技术创新和产业升级,为经济社会的高质量发展提供有力支持。

开展能源系统规划研究是构建新型能源体系的重要基础。能源系统规划是指为实现特定目标(如能源安全、低碳转型、经济高效等),依据一定时期的国民经济和社会发展进程,通过系统分析和科学决策,对能源资源的开发、转换、传输、储存、消费等全链条进行统筹设计与动态调整的综合研究过程。它的核心在于平衡能源供需、优化资源配置、协调技术路径,为新型能源体系提供明确的战略指导和目标设定^[1]。能源系统规划涉及技术、经济和政策等多维度的挑战^[2]。例如,在能源供应端,风电、光伏等新能源具有显著的随机性和间歇性,与用电需求的持续刚性增长特性间存在较大矛盾;在能源消费端,随着电动汽车的快速发展,充电桩、充电网络等设施布局加速推进,需探索将电动汽车作为电网调

节资源的有效路径^[3]。同时,氢能、生物质等能源建设的成本与技术也涉及到多领域与跨部门,需强化统筹协调规划。

近年来,随着计算能力的显著提升与数据量的爆发式增长,大模型因其强大的数据处理^[4]、模式识别^[5]和决策支持能力,成为攻克各行业难点的关键方法之一,也为解决上述复杂的能源系统规划问题提供了强有力的技术支撑。大模型通常是指由人工神经网络构建的一类具有大量参数的人工智能模型^[6]。它通过自监督学习或半监督学习在海量数据上进行预训练,然后结合指令微调与对齐等方法优化其自身性能,拥有遵循人类指令、解决指定任务、进行复杂推理等能力。目前,已有研究人员通过大模型技术,在电力系统协同规划^[7]、热力管网优化^[8]和交通网络规划等方面进行了多项研究工作。依据深度学习、知识图谱和智能感知识别等技术方法,大模型具备辅助或完全替代研究人员开展完整能源系统规划研究工作的价值与潜力。

然而,目前对于其在能源系统规划中的应用研究仍处于探索阶段,存在以下问题亟待明确:大模型与能源系统规划间的耦合关系是什么;如何系统性归纳提炼能源系统规划的主要任务;如何划分大模型相关技术以适应能源系统规划研究。为此,本文针对大模型在能源系统规划中的应用潜力展开研究,旨在提出从理论到工程实践的系统性研究与应用框架,明确大模型在能源系统规划领域中能做什么、不能做什么、需要攻克哪些难点,进而推动大模型重构能源系统规划领域的认知框架与决策模式,提升能源转型规划的准确性、高效性与前瞻性。

综上所述,研究大模型技术在能源系统规划领域的应用前景,可以有效推动能源结构的转型升级与配置优化,实现能源高效利用、可持续发展以及经济社会的全面协同。本文主要针对大模型在能源系统规划的研究潜力与发展展望进行论述,汇总了能源系统规划的主要任务内容,并探讨大模型在其中可发挥的作用及关键性技术,并围绕学科交叉、资源共享和政策支持等方面,展望未来大模型在能源系统规划中的研究前景,并提出相关倡议。

1 AI大模型的定义概念与内涵

大模型通过海量参数、数据和算力的结合,展现出强大的任务泛化与涌现能力,能够处理海量数据以完成各种复杂任务,成为推动人工智能向通用智能迈进的关键技术。大模型的基本架构通常基于Transformer模型,其核心机制包括注意力机制、位置编码和前馈神经网络等^[9],能够捕捉输入序列中各元素间的依赖关系,学习并描述待处理任务的复

杂特性。文献[10]表明,大模型通过对大规模输入数据的训练,具备理解和生成自然语言的能力,展现出辅助决策方面的潜力,使其在文献分析、系统优化和策略制定等方面具有广泛的应用前景。此外,大模型还可与其他AI技术相结合,如与卷积神经网络结合处理多模态任务、与生成式对抗网络结合用于数据增强^[11]等。

实际上,国内外对大模型分类尚未形成统一标准,本文提供了一种合理的分类方案,涵盖任务功能、参数规模、训练方式、模态处理和应用层级等维度,其完备性可在后续发展中逐步加强。图1描述了大模型分类、主要功能、核心能力及代表模型。从任务处理角度,大模型可分为理解型如 Bert、生成式如 GPT-4,和推理式如 DeepSeek R1;从模态处理的角度,可分为单模态和多模态,包括文本、图像、视频、音频;在训练方式方面,大模型包括预训练、从头训练和迁移训练;在参数规模方面,可分为大模型和经过剪枝、蒸馏等技术压缩处理后的小模型。

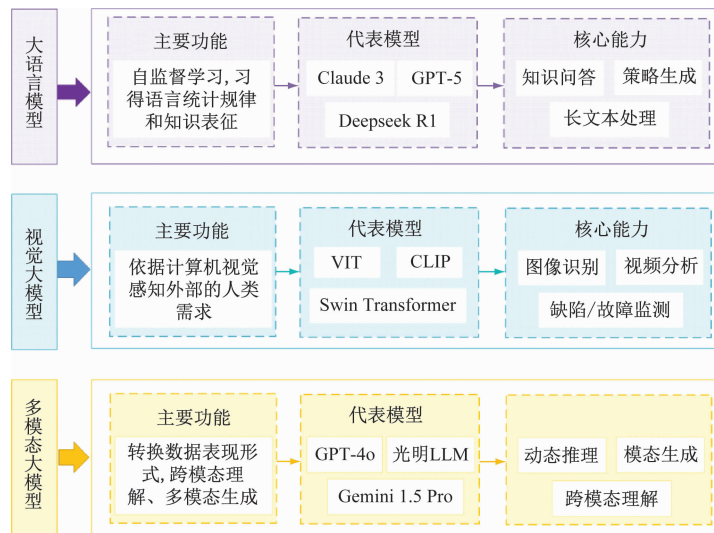


图 1 国内外大模型的具体分类

Fig. 1 Specific classification of large models at home and abroad

本文重点从模型应用领域和模态处理方面进行分类。按照应用层级的不同,大模型可分为通用大模型、行业大模型和垂直大模型。通用大模型采用自回归或自编码方式进行训练,通过指令微调、反馈强化学习等提升任务适应性;行业大模型则偏重于定制化能力,针对特定行业进行预训练和微调,提升专业任务的处理能力;垂直大模型能够处理领域内复杂任务,实现跨模态推理,结合文本、图像和图结构等多种数据形式进行综合分析和预测。按照模态处理的不同,大模型又可以分为大语言模型(LLM)、视觉大模型和多模态大模型等。其中,

LLM 如 GPT-5、Claude 3.7、Sonnet Extended 和 DeepSeek R1 等通过对海量文本数据的自监督学习,得到语言的统计规律和知识表征,具备长文本处理、策略生成、知识问答等核心能力;视觉和多模态大模型如 GPT-4o、CLIP、LLaVA 和 Gemini 1.5 Pro 等,主要依据计算机视觉和多模态等技术感知外部人类需求和实现数据表现形式转换,从而实现跨模态理解、多模态生成和动态推理等多种功能。

本文讨论的能源系统规划 AI 大模型隶属于行业或垂直大模型,是涉及多个任务领域的大模型技术,主要用于解决各类能源系统面向不同需求的方

案设计及规划问题,下节将进行详细阐述。

2 能源系统规划对 AI 大模型的需求

2.1 能源系统规划与 AI 大模型的关联性分析

能源系统规划是在对能源生产、供应、消费的现状和历史资料调查研究分析的基础上,为满足国民经济和社会发展的需求,对一段时期内能源生产、加工、储运、消费发展结构所做的计划、设想和部署,需解决能源供需平衡、经济性、可行性等关键问题^[12]。AI 大模型具有在能源系统规划的各项任务中发挥替代作用的价值或未来潜力,通过智能感知识别、深度学习计算等方法,支撑上述能源系统规划包含的各项任务,辅助(如 Copilot 技术、人机交互模式)或完全替代(如 Agent 智能体技术、AI 主体模式)人类进行完整的能源系统规划^[13]。人机交互模式在各流程中保留了人类与 AI 大模型对话的接口,为大模型完成相关环节提供思路和范围,并审核调整大模型生成的方案;智能体模式则委托 AI 大模型完成全部流程,相关操作依靠自身完成。

能源系统规划是长期受到广泛关注和研究的重要议题^[14]。依据相关问题、方法的综合梳理以及现有研究中的类型划分标准,不同能源系统规划的研究对象、产业环节、能源品种、行业领域、时间尺度、空间尺度及研究方法存在差异^[15]。研究对象方面,能源系统规划涉及能源、技术、环境、经济等多项维度^[16],不同规划涵盖维度存在区别,例如宏观能源系统规划统筹国家或区域的能源安全、经济增长和环境保护^[17],制定中长期发展蓝图,电力系统、能源枢纽规划聚焦技术容量规划、短期调度和运行可靠性等层面的问题^[18-19],可再生能源选址规划则关注资源评估、空间布局和产能设定^[20]。产业环节方面,现有部分研究基于能源的生产、传输、消费步骤进行类型划分,各步骤均实现能量平衡,能源生产规划进行火电、油田等供能单元的合理配置^[21],能源传输规划开展电网、天然气等能量输送通道的建设研究,而能源消费规划则探究需求侧用户响应、终端用能结构等问题,现有部分研究以能源需求规划、能源供应规划、能源供需集成规划作为产业环节角度的主要分类。能源品种方面,不同规划问题基于自身研究需要纳入煤炭、石油、电力、氢等能源品种^[22],例如电力系统规划、电力市场交易演化博弈等仅考虑电力(或纳入氢、热力等),宏观能源系统规划等纳入多类主要的能源品种。行业领域方面,能源被应用于经济相关的所有部门,可分为农业、工业、商业和居民用能^[23],宏观能源系统规划范围涵

盖跨领域,部分研究聚焦工业、交通、建筑等特定行业规划^[24]。时间尺度方面,分为短期(小时、天、月、年)、中期(1~10 a)和长期(超过 15 a)3 种能源系统规划期限^[25];短期规划决策是基于现有技术,目的在于调控产量和确保服务可靠性^[26];中期规划则考虑引入新技术的可能性,确保在更长时间内满足能源需求^[27];长期规划通过预测能源需求变化并考虑设备更新速率限制,开发新的基础设施并促进新技术发展^[28]。空间尺度方面,依据服务对象的差异,不同规划问题考虑全球^[29]、国家区域、园区等空间范围边界,部分规划模型采用分地区(节点)的方法提高分辨率,如潮流模型、分省模型等^[30]。研究方法方面,情景计算模拟、演化博弈、计量经济模型(如投入产出法)、能流潮流模型、地理信息系统(GIS)空间分析、关键指标最优化等均为能源系统规划的常用手段^[31],分别用于解决适当规划目标、研究范围、描述指标下的能源系统规划问题^[32]。

上述分析表明,开展能源系统规划研究需要明晰研究对象、产业环节、时空尺度和规划方法等^[33],并拥有能源、经济与技术等方面的数据支撑^[34],据此提炼得出基本问题包含的 5 项共同主要任务^[35],以及相同任务中所需选用的不同方法和尺度。规划对象、目标及指标确立,涵盖边界范围划分、关键指标构建、时空分辨率设定等。能源数据研究,涵盖现状分析、基础数据搜寻等^[36]。能源需求预测,基于专家访谈、文献或实地调研等知识,或系统动力学、机器学习方法的时间序列预测等^[37]。能源系统规划方法设计,涵盖目标导向的直接规划、指标综合评价、长期能源替代规划(LEAP)情景计算分析、碳排放和成本等指标优化和投入产出等^[38]。结果审定与调整,涵盖合理性评估、方案比选及修订和政策建议等^[39]。

图 2 给出了大模型在能源系统规划中的应用场景和关键技术。根据能源系统规划领域的关键研究内容与任务,大模型在其中可发挥的作用及重要技术方法主要包括以下方面:

(1) 在规划对象、目标及指标确立方面,大模型可依据海量能源系统规划领域文本数据进行深度自监督学习,并通过提示词工程及检索增强生成(RAG)等关键技术习得知识表征和语言统计规律,以训练自身在能源系统转型方面的长文本处理、知识检索决策等核心能力,进而服务于能源系统规划任务中的边界范围划分,关键指标构建及时空分辨率设定等多项问题。

(2) 在能源数据研究方面,大模型可结合梯度

提升树、长短期记忆网络(LSTM)、随机森林等数据挖掘方法以及 Z-Score、偏差校正等数据标准化方法,分析现有能源系统规划领域相关数据的时空依赖性(如电力负荷)、多源异构(如气象和电网数据等)等特性,自动检索、识别、提取和清洗所需序列信息,同时也可依据生成对抗网络(GAN)合成数据、迁移学习跨领域适应等数据增强方法,与连通性离群因子、自编码器等异常检测方法,去除无效性数据,并对收集到的能源系统规划基础数据集合后进行数据质量提升及实时更新。

(3) 在能源需求预测方面,大模型可通过层次聚类、主成分分析等无监督学习方法,来辨别当前能源系统规划问题应选取何种形式(如专家、文献知识或建立时序预测模型等)开展能源需求预测工作,同时大模型所依据的 Transformer 架构可通过自注意力机制计算序列中任意位置元素间的相关性,突破常规深度学习方法的顺序计算限制,可并行建模能源需求中待预测变量与输入数据间的长期依赖关系。依据大模型底层架构设计、预训练数据特性以

及模式捕捉能力等综合作用,实现能源系统规划任务中多项需求变量的准确预测。

(4) 在能源系统规划方法设计方面,大模型可采用微调、推理加速、实例推导和智能感知识别等方法,建立刻画能源系统物理特性的数学模型(或基于历史数据规律总结训练形成的数学模型),生成计算逻辑等式或不等式,智能选取计算工具与高效求解器,将模型转化为常用编程平台中可实现的代码以开展计算求解,支撑能源系统规划问题中的目标导向研究、情景计算分析、碳排放或成本指标优化等任务。

(5) 在结果审定与调整方面,大模型可依据跨模态理解、多模态生成和可解释性分析等手段,自动进行规划结果的可视化展示及敏感性分析,选取或生成关键性分析情景和评价指标以合理地评估所得能源系统规划结果的优劣性,并开展规划方案的合理比选与修订。同时,也可结合大模型的上下文关联捕捉及深度语义理解等能力,撰写所需研究报告,完成能源系统规划的最终流程步骤。

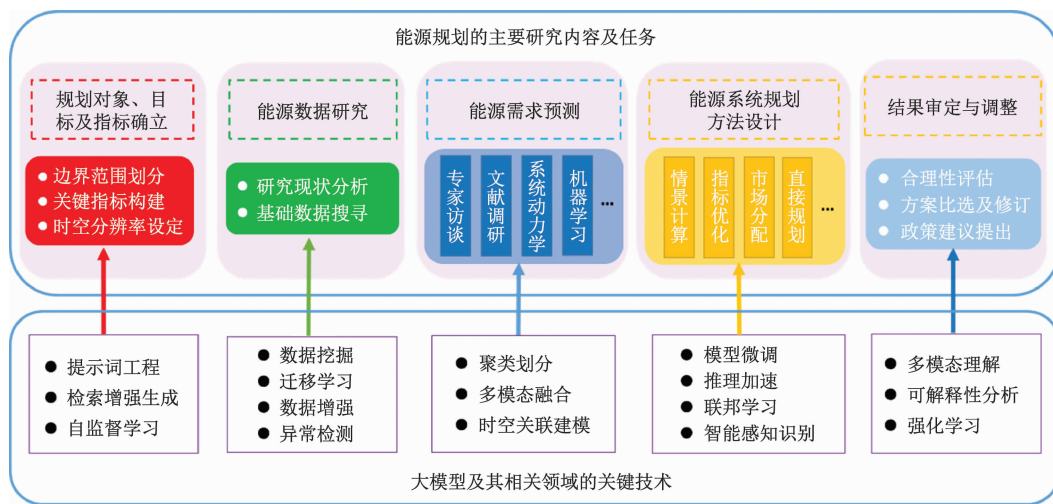


图 2 大模型在能源系统规划领域的应用场景及关键技术

Fig. 2 Application scenarios and key technologies of large models in the field of energy system planning

在不同能源规划任务中,人工与 AI 大模型的分工协同逻辑存在差异。选取规划对象、目标及设计方法时,AI 大模型基于提示词工程、RAG、微调、推理加速和智能感知识别等技术^[40],理解人的需求并生成满足要求的规划形式、数学模型、计算方式等^[41],设计理念和可选方法通过人工提供,结果受人工监督、评估和修正,AI 大模型作为外部工具发挥辅助支持功能^[42]。开展数据研究及需求预测方面,AI 大模型扩展了人工检索资料、学习知识、深化认知的容量和速度边界,可增强搜集和处理海量、多模态的能源规划相关数据的能力^[43-44],通过无监督

学习、自注意力机制等技术可增加数据预测能力,增强人工感知和分析能力。进行规划方案审定、比选修订与报告撰写时,AI 大模型既可增强完成结果的多模态呈现,也可结合大语言模型、语义理解和强化学习,辅助产出新的分析框架。

2.2 AI 大模型在能源系统规划领域应用现状

对于规划对象、目标及指标确立任务,当前 AI 大模型可依托提示词工程与 RAG 技术,对政策文本、地理数据信息、历史规划案例进行解析与整合,进而参考仿照此前已有的类似能源系统规划案例,对边界范围进行智能界定,进行指标的初步构建,并

根据要求推荐适宜的时空分辨率,相关应用较为成熟。这一技术能够为研究者高效整合当前能源系统规划的基本背景,初步建立相对合理的规划目标。例如,当前 Deepseek 等大语言推理模型均可作为研究者提出的能源系统规划课题提供初步的准确性尚可的规划对象、目标及指标。

对于能源数据获取与处理任务,当前 AI 大模型可凭借过参数化带来的较强的泛化能力,利用语义高效替代完成简单的数据清洗、检测、填补等重复性较强、需要较多人力投入的数据处理工作。这一相对成熟的技术可以应对能源规划模型中数据缺失的挑战。文献[45]研究了基于 Graph Transformer 的交通数据插补模型,充分保留语义信息,利用语义描述捕捉能源系统数据中的物理关系,并且允许用户以通俗易懂的语言提出请求,以快速完成能源规划模型数据的清洗工作。与传统数据插补等方法相比,基于 LLM 和提示工程的插补方法无需专业知识或复杂的数学模型。

对于能源供需预测任务,当前 AI 大模型在多模态数据融合、时空关联建模与自适应预测推理等方面展现出较为成熟的应用。这一技术可以依托数据挖掘与聚类划分技术,使大模型可实现对气象、经济、社会行为等多元数据的深度整合;依托主成分分析与预训练技术组合应用,使大模型可捕捉能源供需的时空演化规律,进而为能源系统规划提供数据支撑。例如,当前业内已有利用 AI 大模型平台对能源供需进行预测,如南方电网已建成并投产国内首个 AI 负荷预测系统,并将负荷预测准确率从人工预测的 96.8% 提升至 97.4%,提高 0.6 百分点^[46],为能源系统规划提供了有效的供需预测数据支撑。

对于系统规划方法设计任务,当前 AI 大模型可通过模型微调、推理加速,以有效应对能源系统规划领域多专业学科交叉的挑战,相关应用较为成熟。这一技术可通过对大模型进行能源规划专业领域的模型微调训练,提升模型在垂直领域的专业性,使大模型可以在能源规划的细分领域实现目标导向的直接规划、情景计算和指标优化。例如上海核工程研究设计院有限公司在核电设计流程中,开发构建了核能行业的“智汇星”核电设计大模型,该模型参数量达 130 亿,整合了大量设计准则、经验及法律法规要求,从智能设计、安全分析、质量跟踪等方面有效支撑了核电规划与设计。

对于规划结果审定与调整任务,多模态大模型在帮助科研人员进行规划结果的可视化与敏感性分

析、提升结果可解释性,以及审查设计文档方面,有较为成熟的应用。多模态模型可凭借其数据的感知与分析能力,将能源系统规划结果整理成结构性数据表,并通过调用多模态模型中的代码模块,利用 Python 等编程语言的可视化库,按照给定需求自动完成数据可视化的程序编写工作,生成符合科学规范的图表。在敏感性分析方面,RAG 技术的应用使得大模型可以在线获取最新的能源规划领域的敏感性分析方法,并通过代码的方式具体实现,对上述规划结果进行敏感性分析。同时,对多模态模型进行微调与提示词工程的处理,可以让模型自动生成标准化报告,这在医学、企业管理领域已有较多专利,在能源规划领域有成熟、广阔的应用前景,如南方电网研发的国内首个自主可控的 AI 大模型“大瓦特”已具备自动生成巡检报告、可视化数据服务等能力。

综上所述,人工智能大模型在能源规划领域呈层级化架构,形成“需求解析-模型构建-方案求解”的闭环。应用层以 LLM 与 RAG 为核心,前者解析规划需求、生成结果,后者检索动态数据提供知识支撑以规避模型幻觉;建模层由 Agent 主导,将需求拆解为数学约束,转化为优化求解器可识别的模型;求解层依赖专业求解器对规划模型执行运算并输出最优解。该架构既能发挥大模型交互与认知优势,又保障了规划结果的科学性。

2.3 AI 大模型在能源系统规划领域应用的挑战

对于规划对象、目标及指标的确立任务,当前 AI 大模型在特定语境理解、区域政策适应性以及跨学科目标协调方面存在不足,需要突破特定领域的知识增强与定制化训练技术。这一技术能够对应能源规划中的区域能源战略差异化与多目标协同优化问题。例如,不同地区的碳减排政策与经济发展目标存在差异,单一的通用模型难以准确识别具体情境下的优先指标或目标权重,需要借助针对特定情境的微调和专家知识融入,以实现具体地区能源目标的精准识别与指标体系的合理构建。

对于能源数据获取与处理任务,当前 AI 大模型在处理 PDF、图片、知识产权受限文件等异构格式数据的能力存在不足,需要突破多模态数据融合与识别技术^[47]。这一技术能够对应能源规划中数据质量、全面性与及时性的问题。例如,能源行业的标准、白皮书和报告通常以扫描 PDF 或图像形式发布,传统文本模型无法有效处理这类非结构化数据,导致能源系统规划模型的数据源受限、数据可信性与实时性不足。

对于能源供需预测任务,当前 AI 大模型在长

期趋势捕捉、复杂系统泛化能力与预测结果的可解释性方面存在不足,需要突破长序列预测模型与可解释性人工智能技术。这些技术能够对应到能源系统规划中长期需求预测和不确定性风险分析问题^[48]。例如,传统的 LSTM 模型在长序列预测中表现不稳定且缺乏透明度,难以满足能源系统规划中长期负荷预测对稳定性与解释性的严格要求^[49]。

对于能源系统规划方法设计任务,当前 AI 大模型在自主选择、配置和优化复杂规划模型,并确保其选择过程与内部机制的透明可解释性方面存在不足,需要突破复杂决策逻辑的可解释性与规划模型自动构建技术。这一技术能够对应能源规划中复杂模型选择的智能化与规划过程的透明化、可信化问题。例如,面对特定区域的能源转型需求,AI 大模型可基于现有文献和数据推荐采用 LEAP 模型进行情景分析,或运用投入产出模型评估经济影响,但其选择依据、模型参数的设定过程往往缺乏透明度,或难以动态适应特定约束,使得规划结果难以被决策者完全信任和采纳。

对于规划结果审定与调整任务,当前 AI 大模型在对规划方案进行深度逻辑校验、多维度合理性评估以及根据反馈进行精准迭代优化方面存在不足,需要突破规划方案的自动评估、一致性校验与迭代优化技术。这一技术能够对应能源系统规划中规划方案的质量控制、多方案权衡的辅助决策以及政策建议的动态优化问题。例如,AI 大模型在生成能源系统规划报告初稿后,可能因缺乏对能源系统复杂关联性的深度理解或自我审视能力不足,导致报告中不同章节(如供需平衡、经济成本、环境影响)的结论存在潜在矛盾,或提出的政策建议与区域发展实际、特定利益相关者诉求脱节。通过引入自动评估与迭代优化技术,模型可以对照预设的评估标准(如成本效益分析、环境影响评价指标、社会可接受度、技术可行性)和内部一致性规则进行自我检查,识别潜在的不一致性或次优部分,并结合模拟反馈或专家意见进行针对性修订,从而提升最终报告的质量与实用性。

2.4 AI大模型在能源系统规划领域的应用空白

数据研究与处理方面,一是缺少高质量能源系统规划数据库。能源系统规划依赖海量时空数据,但由于其标准化和操作性差,数据跨行业、跨部门,缺乏统一标准和共享机制,使得构建高质量、一体化的数据库成为难题;尤其是多源数据(如电力负荷、气象、经济社会指标等)融合难度大,影响了 AI 大模型的训练与推理,导致不同系统难以无缝集成与

共享。能源部门缺乏标准化、可互操作数据库,阻碍 AI 决策支持系统的准确性与可扩展性。二是当前大模型尚不具备处理多模态、非结构化能源数据的能力。目前的 AI 大模型主要依赖结构化数据(如统计表格),缺乏对非结构数据的整理与规范能力。

能源需求预测方面,当前尚未开发出能够模拟极端事件(如自然灾害、突发地缘政治冲突)对能源需求影响的动态自适应 AI 大模型。目前的预测模型多基于历史趋势,缺乏对突发事件的实时响应能力。未来,需开发基于事件驱动的强化学习模型,结合实时全球事件流,动态调整能源需求预测。

能源系统规划方法设计层面,当前缺乏成熟的能源系统规划大模型平台。需开发专用于能源系统规划的 AI Agent,通过集因果推理、物理知识嵌入和多智能体协作,构建能够理解能源系统规划复杂动态、执行动态优化并满足多目标约束的智能决策系统。加强 AI 大模型对能源系统规划物理层面的理解能力,从根本上提升 AI 大模型在能源系统规划中的智能化水平,推动能源系统规划领域 AI 大模型从统计驱动的“数据智能”向着具备自主推理、调整与适应以及执行能力的“真正智能”转变。

针对结果审定与调整方面,目前尚不存在能够自动输出多模态(如报告、视频、交互式仪表盘)能源系统规划结果的大模型。目前的输出多停留在静态报告层面,缺乏动态、可交互的呈现方式。现有模型未集成多模态生成技术,如文本转视频、交互式可视化,且语言本地化能力有限。未来需加强多模态生成的 AI 大模型,自动生成多格式能源系统规划报告和实时可交互的决策支持工具。

此外,AI 模型的可解释性、透明性与治理机制欠缺。现有 AI 模型的“黑箱”特性导致预测结果难以解释和验证,政策制定者和监管者难以信任模型内部决策逻辑,这在对稳定性要求极高的能源调度与规划中是突出隐患。文献^[50]指出,智能能源系统中 AI 可解释性研究分散、聚焦狭窄,缺乏统一治理框架,制约其在法规和标准中的落地。

情景生成与跨尺度集成能力欠缺,完全由大模型自主推理或生成“总分总”的端到端规划方案能力仍为空白。能源系统规划需结合气象、市场、政策、用户行为等多源信息进行场景分析与优化,但大模型在多模态、多尺度数据融合与复杂场景生成方面尚未充分能力化。现有研究多聚焦单一环节(如需求预测、可再生发电排布),缺乏端到端的“总体规划-仿真-优化”闭环解决方案^[51]。

3 发展展望

3.1 资源共享与数据生态共建

当前能源系统规划数据的碎片化以及 AI 大模型开发的高门槛,显著制约了 AI 技术在能源系统规划领域的广泛应用。因此,推动模型开源、数据开源以及共建公用数据库以降低 AI 技术与数据壁垒,进而加速能源规划智能转型势在必行。未来,需开源能源规划专用大模型使更多主体能够基于预训练模型进行微调或二次开发,快速适配本地化需求。同时,开源模型应配备详细的文档、案例库和基准测试数据集,降低使用者的技术门槛,便于中小型能源企业应用于自身能源系统规划,降低开发成本的同时提升规划效率。此外,构建能源规划数据交易机制,建立能源规划数据交易平台。允许企业、政府和研究机构以匿名化或加密形式共享数据。共同构建能源规划数据生态链,结合 AI 大模型的数据清洗与增强能力,对能源数据进行异常检测与缺失值填补,提升数据完整性与时效性。此外,构建专用于能源规划领域的公用数据库保证实时数据接入与更新,推动多模态数据融合,支持结构化数据、非结构化数据以及实时数据流的统一存储与处理。

3.2 AI 大模型技术升级与能源系统规划深度融合

未来,需完成 AI 大模型架构优化、推理能力增强、可解释性提升和动态适应性改进,推动大模型从统计驱动向具备因果推理和物理约束嵌入的“真正智能”演进,实现 AI 大模型与能源系统规划任务的深度耦合,从而满足能源规划多目标优化、跨尺度集成和实时决策的需求。开发混合架构模型,将 Transformer 的序列建模能力与图神经网络的拓扑分析能力结合。引入分解式模型,通过分解趋势和季节性成分,增强 AI 大模型对复杂能源系统的长期预测能力,解决传统 LSTM 模型在长序列预测中的不稳定性。其次,需通过因果推理技术增强大模型的决策能力,基于结构因果模型或贝叶斯网络,构建能源系统的因果关系图,明确能源规划变量间的因果路径。同时,需开发基于物理约束的混合模型,将能源系统的物理规律嵌入模型架构,引入模块化设计,将大模型分解为预测、优化和验证子模块,各模块提供独立的解释性输出,便于能源规划任务后期的调试和审查。

3.3 平台规范与性能标准评价体系构建

未来,需制定涵盖 AI 大模型的能源系统规划方法、数据和评价的全生命周期标准,以支撑从区域到全球能源规划的多尺度任务,促进 AI 大模型在

能源规划领域的规范化与标准化。在能源系统规划大模型开发阶段,应规范核心算法的选择与设计,规定模型的模块化设计原则,确保能源规划大模型中的预测、优化和验证等模块可独立开发与组合,方便跨任务复用。在训练流程中,需标准化预训练、微调和提示工程的规范。提供统一的任务描述模板,明确输入输出格式,降低开发者的配置成本。其次,应统一数据格式与存储规范,制定统一的能源数据标准,扩展现有标准(如 IEC 61850)至新能源和多能源系统,规范数据格式、单位和语义,降低跨领域整合的复杂性。通过嵌入结构化知识表示,映射不同数据域间的语义关系,实现特征无缝对齐,降低语义歧义,提升融合数据的可解释性和建模精度。基于标准的能源规划数据建立开源模型库,涵盖针对电力系统规划、能源需求预测、碳排放评估等任务的预训练模型,提供标准化的 API 接口和模块化设计,支持跨平台部署,以适应不同计算环境。此外,应制定 AI 大模型在能源系统规划任务中需涵盖的预测精度、优化效率、可解释性等指标,通过注意力可视化等工具进行量化,评估模型输出对输入特征的依赖程度,为 AI 大模型提供客观的性能评估框架,确保能源系统规划结果的可靠性。

3.4 政策驱动与跨学科场景协同

政策支持是 AI 大模型在能源系统规划领域落地的关键驱动力,未来政府可通过公私合作模式,鼓励能源企业投资 AI 技术,分享研发成果。出台数据共享与隐私保护政策,平衡数据开放与安全需求。针对欠发达地区提供技术援助与低成本部署方案,缩小能源转型的区域差距。其次,能源系统规划的复杂性要求 AI 大模型超越单一技术框架,实现多学科交叉融合,形成综合性解决方案。未来,需打破人工智能、能源工程、经济学、环境科学和社会学等领域的知识壁垒,构建适应能源规划需求的理论与技术体系。此外,需要整合政府、企业、研究机构及高校等多方资源,共同搭建应用于不同尺度、不同场景的能源系统规划领域 AI 大模型。

3.5 算力适配与实证迭代优化

AI 大模型在能源系统规划中的应用潜力需结合实际算力、开展实证研究和效果验证来实现。为实现实践落地,需优化算力分配与模型效率,降低能耗与部署成本。针对高实时性的能源系统规划任务,可采用高性能 GPU 集群或 TPU,通过并行计算加速模型推理。探索绿色算力解决方案,利用可再生能源驱动数据中心,通过动态调度算法优化算力分配。其次,实证研究是 AI 大模型从理论到实践

的桥梁,需聚焦典型能源系统规划场景,验证模型在实际系统中的性能。依托产学研联合试点,建立测试平台,打造国家级人工智能与能源系统规划耦合性研究的实验室或综合能源系统示范区。此外,建立多维评估框架,引入专家评估与实际运行数据的双重验证,以便实时模拟能源系统运行,快速验证模型输出。推动项目落地,通过持续改进形成技术迭代闭环,开发智能化运维平台,实时监控模型性能,自动触发更新机制。

3.6 强化行业治理与可信性约束

能源系统的安全敏感性、数据涉密性及规划结果的民生关联性极高,能源行业在 AI 应用中高度关注安全、合规与结果可追溯性。从行业治理的角度,需构建适配能源场景的 AI 治理体系。一方面,需完善数据治理规则,明确能源政策、负荷数据等敏感信息的检索与使用边界,避免数据泄露或滥用;另一方面,应建立算法监管机制,对 Agent 拆解需求、优化求解器运算等关键环节进行流程备案,确保规划过程可审计。在可信性约束层面,可在应用层强化 RAG 的数据溯源能力,在建模层增加合规性校验模块,确保数学约束符合碳排放、供电可靠性等行业标准,为能源行业 AI 应用提供安全保障,助力行业高质量发展。

4 结论

(1) 通过分析能源系统规划中的研究对象、产业环节、时空尺度、规划方法和数据支撑等主要内容,提炼得出能源系统规划中包含的主要共同任务,以及各类任务中需选用的不同方法和尺度。

(2) 根据能源系统规划的关键研究内容与任务,分别从规划对象、目标及指标确立、能源数据研究、能源需求预测、能源系统规划方法设计和结果审定与调整等层面分析大模型在其中可发挥的作用及重要技术方法。

(3) 汇总分析了 AI 大模型在能源系统规划领域的研究及应用现状、挑战和空白,讨论并说明了未来 AI 大模型在能源系统规划中的具体技术前景和发展展望。

参考文献:

[1] 王心玉,李金航,陈衡,等. 同时参与绿证交易-碳交易的区域多能互补电力系统优化调度[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(2): 315-324.
WANG Xinyu, LI Jinhang, CHEN Heng, et al. Optimization scheduling of regional multi-energy comple-

mentary power system participating simultaneously in green certificate trading-carbon trading[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(2): 315-324.

- [2] 刘康祥,周家辉,徐钢,等. 面向高比例可再生能源消纳的光储氢醇一体化系统规划与调度[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(11): 1477-1486.
LIU Kangxiang, ZHOU Jiahui, XU Gang, et al. Planning and scheduling of integrated system of light hydrogen storage and methanol for high proportion of renewable energy consumption[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(11): 1477-1486.
- [3] 周建国,吴昭波. 双碳目标下基于 Stackelberg 和合作博弈的虚拟电厂双层优化调度[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(10): 1611-1619.
ZHOU Jianguo, WU Zhaobo. A two-level optimization scheduling of a virtual power plant based on Stackelberg and cooperative game theory under the dual carbon goals[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(10): 1611-1619.
- [4] 盛稳,徐世明,卢官发,等. 基于 KPCA-BiLSTM-GRU 的汽轮机主蒸汽流量测量模型[J]. *动力工程学报*, 2025, 45(9): 1483-1491, 1510.
SHENG Wen, XU Shiming, LU Guanfa, et al. Main steam flowrate measurement model for steam turbines based on KPCA-BiLSTM-GRU[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2025, 45(9): 1483-1491, 1510.
- [5] 陶超,郭鑫,胡柯彦,等. 以语言为媒介的遥感图像跨时空领域自适应语义分割[J]. *中国图象图形学报*, 2025, 30(9): 3153-3170.
TAO Chao, GUO Xin, HU Keyan, et al. Language-guided cross-spatiotemporal domain adaptation for remote sensing image semantic segmentation[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2025, 30(9): 3153-3170.
- [6] LI Xuan, TIAN Yonglin, YE Peijun, et al. A novel scenarios engineering methodology for foundation models in metaverse[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2148-2159.
- [7] 李玉峰,宗国庆,张东豪. 基于具身大模型的多场景智能巡检机器人系统框架与多机器人协同应用集成研究[J]. *智能计算机与应用*, 2025, 15(5): 37-43.
LI Yufeng, ZONG Guoqing, ZHANG Donghao. Research on the embodied large model-based multi-scenario intelligent inspection robot system framework and multi-robot collaborative application integration [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2025, 15

- (5): 37-43.
- [8] 黄虎. 基于深度学习的替代模型在油气藏生产优化中的研究与应用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2024.
- [9] ZAINEL Q M. Leveraging large language models and GAN-augmented data for energy load prediction[J]. **Journal of Electrical Systems**, 2024, 20(11s): 1926-1940.
- [10] 任海玉, 刘建平, 王健, 等. 基于大语言模型的人工智能问答系统研究综述[J]. **计算机工程与应用**, 2025, 61(7): 1-24.
REN Haiyu, LIU Jianping, WANG Jian, et al. Research on intelligent question answering system based on large language model[J]. **Computer Engineering and Applications**, 2025, 61(7): 1-24.
- [11] 孙柏林. 大模型评述[J]. **计算机仿真**, 2024, 41(1): 1-7, 24.
SUN Bolin. Review of large models[J]. **Computer Simulation**, 2024, 41(1): 1-7, 24.
- [12] 刘贞, 张希良, 高虎, 等. 区域可再生能源规划基本框架研究[J]. **中国能源**, 2010, 32(2): 38-41.
LIU Zhen, ZHANG Xiliang, GAO Hu, et al. Research on basic framework of regional renewable energy planning[J]. **Energy of China**, 2010, 32(2): 38-41.
- [13] PAVL A, FRANCISCO J. Impact of artificial intelligence on the planning and operation of distributed energy systems in smart grids[J]. **Energies**, 2024, 17: 4501.
- [14] GUO Zheng, MA Linwei, LIU Pei, et al. A multi-regional modelling and optimization approach to China's power generation and transmission planning[J]. **Energy**, 2016, 116: 1348-1359.
- [15] CHEN Siyuan, LIU Pei, LI Zheng. Low carbon transition pathway of power sector with high penetration of renewable energy[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2020, 130: 109985.
- [16] 徐新智, 杜尔顺, 高艺, 等. 电力系统运行模拟与容量规划工具研究与应用综述[J]. **电力系统自动化**, 2022, 46(2): 188-199.
XU Xinzhi, DU Ershun, GAO Yi, et al. Overview on research and application of power system operation simulation and capacity planning tools[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2022, 46(2): 188-199.
- [17] CONTALDI M, GRACCEVA F, TOSATO G. Evaluation of green-certificates policies using the MARKAL-MACRO-Italy model[J]. **Energy Policy**, 2007, 35(2): 797-808.
- [18] 齐天宇, 张希良, 何建坤. 全球能源经济可计算一般均衡模型研究综述[J]. **中国人口资源与环境**, 2016, 26(8): 42-48.
QI Tianyu, ZHANG Xiliang, HE Jiankun. Review of research on global energy-economic computable general equilibrium models[J]. **China Population, Resources and Environment**, 2016, 26(8): 42-48.
- [19] LI Zhidong. An econometric study on China's economy, energy and environment to the year 2030[J]. **Energy Policy**, 2003, 31(11): 1137-1150.
- [20] 吉平, 周孝信, 宋云亭, 等. 区域可再生能源规划模型述评与展望[J]. **电网技术**, 2013, 37(8): 2071-2079.
JI Ping, ZHOU Xiaoxin, SONG Yunting, et al. Review and prospect of regional renewable energy planning models[J]. **Power System Technology**, 2013, 37(8): 2071-2079.
- [21] HE Yuezhong, LI Zheng, LIU Pei. A co-production system of cement and methanol: unveiling its advancements and potential[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2024, 473: 143523.
- [22] 罗仕华, 胡维昊, 刘雯, 等. 中国2060碳中和能源系统转型路径研究[J]. **中国科学: 技术科学**, 2024, 54(1): 43-64.
LUO Shihua, HU Weihao, LIU Wen, et al. Transition pathway for China to achieve carbon neutrality by 2060[J]. **Scientia Sinica Technologica**, 2024, 54(1): 43-64.
- [23] 国网能源研究院有限公司. 全球能源分析与展望2021[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [24] DE LA PEÑA L, GUO Rui, CAO Xiaojing, et al. Accelerating the energy transition to achieve carbon neutrality[J]. **Resources, Conservation and Recycling**, 2022, 177: 105957.
- [25] JAVANMARD M E, GHADERI S F. Energy demand forecasting in seven sectors by an optimization model based on machine learning algorithms[J]. **Sustainable Cities and Society**, 2023, 95: 104623.
- [26] LI Tianxiao, LIU Pei, LI Zheng. A multi-period and multi-regional modeling and optimization approach to energy infrastructure planning at a transient stage: a case study of China[J]. **Computers & Chemical Engineering**, 2020, 133: 106673.
- [27] 刘强, 王怡, 洪倩倩. “碳中和”情景下能源转型的选择与路径[J]. **中国能源**, 2021, 43(4): 19-26.
LIU Qiang, WANG Qia, HONG Qianqian. Choice and route of the energy transition under the scenario of carbon neutrality[J]. **Energy of China**, 2021, 43(4): 19-26.
- [28] 江训谱, 包哲静, 于森, 等. 考虑源荷不确定性的园

- 区综合能源系统鲁棒多阶段规划[J]. *电力建设*, 2025, 46(4): 99-112.
- JIANG Xunpu, BAO Zhejing, YU Miao, et al. Robust multi-stage planning of park-level integrated energy system considering source-load uncertainties[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(4): 99-112.
- [29] SONMEZ M, AKGÜNGÖR A P, BEKTAŞ S. Estimating transportation energy demand in Turkey using the artificial bee colony algorithm[J]. *Energy*, 2017, 122: 301-310.
- [30] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 385-393.
- HUANG Zhihui, JI Liang, YIN Jie, et al. Peak pathway of China's road traffic carbon emissions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 385-393.
- [31] 中国石油集团经济技术研究院. 世界与中国能源展望[R]. 北京: 中国石油天然气有限公司, 2022.
- [32] 陈荣, 张希良, 何建坤, 等. 基于 MESSAGE 模型的省级可再生能源规划方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(9): 1525-1528.
- CHEN Rong, ZHANG Xiliang, HE Jiankun, et al. Provincial level renewable energy planning based on the MESSAGE model[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2008, 48(9): 1525-1528.
- [33] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国 2035 年及中长期低碳发展战略 2023[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.
- [34] 黄韧. “双碳”目标下北京市能源转型重点领域及路径研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [35] 钟海旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 新型电力系统中的规划运营与电力市场: 研究进展与科研实践[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(18): 7084-7103.
- ZHONG Haiwang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Planning, operation and market of new power system: research progress and practice[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7084-7103.
- [36] 牛皓玮, 刘达, 陈广娟. 双碳及能源安全背景下电煤供需策略演化博弈研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(9): 8-15.
- NIU Haowei, LIU Da, CHEN Guangjuan. Evolutionary game of thermal coal supply and demand strategy under carbon peak, carbon neutrality and energy security[J]. *Smart Power*, 2022, 50(9): 8-15.
- [37] HOLTTINEN H, TUHKANEN S. The effect of wind power on CO₂ abatement in the Nordic countries [J]. *Energy Policy*, 2004, 32(14): 1639-1652.
- [38] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(22): 6445-6462.
- BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(22): 6445-6462.
- [39] PRASAD R D, BANSAL R C, RATURI A. Multifaceted energy planning: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38: 686-699.
- [40] GRYS M, CASCIANO R, PIENIAZEK I. MSR56 comparison of AI-enhanced tools for automating scientific literature reviews[J]. *Value in Health*, 2025, 28(6): S284.
- [41] JOHNSON B, BIRD C, FORD D, et al. Make your tools sparkle with trust: the PICSE framework for trust in software tools [C]//*Proceedings of 2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice*. Melbourne, Australia: IEEE, 2023: 409-419.
- [42] BURKE C M. AI-assisted exam variant generation: a human-in-the-loop framework for automatic item creation[J]. *Education Sciences*, 2025, 15(8): 1029.
- [43] ONCIUL R, TATARU C I, DUMITRU A V, et al. Artificial intelligence and neuroscience: transformative synergies in brain research and clinical applications[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2025, 14(2): 550.
- [44] AKILA K, GOPINATHAN R, ARUNKUMAR J, et al. The role of artificial intelligence in modern healthcare: advances, challenges, and future prospects[J]. *European Journal of Cardiovascular Medicine*, 2025, 15(4): 615-624.
- [45] ZHANG Kunpeng, ZHOU Feng, WU Lan, et al. Semantic understanding and prompt engineering for large-scale traffic data imputation [J]. *Information Fusion*, 2024, 102: 102038.
- [46] 肖亮, 梁寿愚. 南方电网建成并正式投产国内首个网省一体的人工智能负荷预测平台[EB/OL]. (2022-10-21) [2022-10-21]. <http://www.senn.com.cn/syzx/2022/10/21/149394.html>.
- [47] LI Yihao, EL HABIB DAHO M, CONZE P H, et al. A review of deep learning-based information fusion techniques for multimodal medical image classification[J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2024, 177: 108635.
- [48] WU Haixu, XU Jiehui, WANG Jianmin, et al. Autoformer: decomposition transformers with auto-correlation for long-term series forecasting[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, 34:

- 22419-22430.
- [49] WANG Chong, LI Xiang, SHI Yan, et al. Load forecasting method based on CNN and extended LSTM[J]. **Energy Reports**, 2024, 12: 2452-2461.
- [50] ALSAIGH R, MEHMOOD R, KATIB I. AI explainability and governance in smart energy systems; a review[J]. **Frontiers in Energy Research**, 2023, 11: 1071291.
- [51] UKOBA K, OLATUNJI K O, ADEOYE E, et al. Optimizing renewable energy systems through artificial intelligence: review and future prospects[J]. **Energy & Environment**, 2024, 35(7): 3833-3879.

~~~~~

(上接第 2188 页)

- [21] LIU Jizhen, YAO Qi, HU Yang. Model predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power [J]. **Energy**, 2019, 172: 555-565.
- [22] SUN Yang, XUE Wenchao, DENG Hui, et al. On disturbance estimation-and exploitation-based MPC design with application to level control system [J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2024, 32(4): 1169-1181.
- [23] SUN Yang, XUE Wenchao, LIU Jizhen, et al. Disturbance-exploitation based RMPC with application to multi-objective load frequency control in power systems [J]. **Control Engineering Practice**, 2025, 156: 106179.
- [24] ZHAN Siyuan, CHEN Wenhua, STEFFEN T, et al. Computationally efficient infinite-horizon indefinite model predictive control with disturbance preview information [J]. **Automatica**, 2022, 146: 110667.
- [25] GAUTAM V V, LOKA R, PARIMI A M. Cubature Kalman filter and linear quadratic regulator for load frequency control [J]. **Electric Power Systems Research**, 2023, 222: 109509.