

世界模型与科学智算融合，赋能新型电力系统

■梁凌宇

随着人工智能技术的迅猛发展,DeepSeek、OpenAI、Anthropic、Meta等业界巨头引领的大模型竞争无疑是全球科技热点。当前主流大模型核心能力聚焦于自然语言处理,多国内外知名人工智能专家提出,人工智能需要具备更全面的智能,而不仅仅是语言处理能力,大型世界模型就是一个潜在的发展方向。世界模型能够模拟世界多种模态信息,对事物发展进行推理,并在时间空间中实现互动,更接近于人类的真实智能。不少学者认为,世界模型是通往AGI的一个可能路径,因为实现AGI需具备真正的常识性综合性理解能力,只能通过对世界的内在表征来获得,这也正是世界模型研究的重点。

世界模型(World Model)与科学智算(AI for Science)的融合或将成为下一步学术界和工业界的发展热点。广义上的世界模型可以认为是数字孪生和多模态大模型的融合进阶版本,通过模拟现实世界的全面信息与复杂动态,为人工智能系统提供更强大的推理和预测能力;而科学智算则利用已发现的科学规律,将人工智能技术与科学研究深度融合,推动传统科学计算的变革。两者的结合不仅能实现优势互补,还有望在多个领域催生新的应用场景。本文重点探讨世界模型与科学计算的融合前景,并简要分析如何利用相关技术赋能新型电力系统。

世界模型与科学智算融合分析

世界模型起源可以追溯到强化学习领域,其目标是通过构建一个虚拟环境,使智能体能够在其中进行试错学习,从而提高决策效率,类似于给培训的学生一个面向特定任务的可互动虚拟环境。近年来,随着技术发展,世界模型逐渐从简单的游戏环境扩展到更复杂的现实世界模拟,体现全域物理规律和行为模式。类似于给学生一个无特定任务的互动环境,而且完全符合现实世界的底层科学规律。多模态大模型则通过整合多种模态的数据(如文本、图像、语音等),实现对复杂信息的综合理解和生成。世界模型与多模态大模型相辅相成;前者为后者提供了一个虚拟的“现实世界”,使其能够在模拟环境中进行训练和优化;后者则为世界模型的构建提供了更丰富的数据来源和更强大的学习能力,最终二者走向融合共生。著名AI学者杨立昆(Yann LeCun)提出世界模型是人工智能算法模型的一种新概念,旨在模仿人类和动物通过观察与交互自然地学习关于世界运作方式的知识。如前所述,实现AGI,模型需具备真正的常识性的理解能力,这些能力只能通过对世界的内在表征来获

得。因而世界模型需要有能力处理所有模态的数据信息;可认为是现有多模态大模型乃至全模态大模型的未来发展形态,但不一定是生成式的。当前世界模型主要研究方向包括多模态数据融合与统一建模、模型效率与可扩展性、具身智能与物理世界交互、因果推理与逻辑决策等方面。

科学智算的核心在于将AI技术与科学计算相结合,利用机器学习、深度学习、自然语言处理等AI技术,解决传统科学计算中难以处理的复杂问题。传统科学计算通常依赖于精确的数学模型和数值方法,但在面对高维度、非线性、多尺度的复杂系统时,往往面临计算效率低、模型精度不足等挑战。而科学智算通过数据驱动的方式,能够从海量数据中提取潜在规律,优化计算流程,甚至发现新的科学原理。

科学智算的应用范围非常广泛,涵盖物理、化学、材料科学、生物医学、能源、气候模拟等多个领域。例如,在材料科学中,AI可以通过分析大量实验数据,预测新材料的性能;在气候模拟中,AI可以加速复杂气候模型的运算,提高预测精度;在生物医学中,AI可以帮助解析蛋白质结构,加速药物研发。其核心目标是将人工智能的强大能力转化为科学探索的加速器,推动科学研究从经验驱动向数据驱动和智能驱动转变,为现代科学技术的发展注入新活力。电力系统作为世界上最复杂最庞大的人造系统,蕴含大量复杂数理规律,随着新型电力系统的加快建设,正面临高不确定性所带来的高维、非线性、多时空尺度问题,科学智算可望在其中发挥巨大作用。

世界模型当前主流研究思路基于纯数据驱动,从零开始,通过大量的数据学习现实世界的规律。这种方法虽然具有很强的适应性和灵活性,但在学习效率和准确性方面存在一定的局限性。科学智算则可以利用前人总结的经验和知识,加速对已有知识的学习。例如,在物理学中,牛顿运动定律和麦克斯韦方程等经典理论已经经过长时间的验证和优化。通过将这些理论融入科学智算模型,可以显著提高模型的学习效率和准确性。纯数据驱动的世界模型虽然能够从海量数据中学习规律,但其局限性在于需要大量的训练数据,且难以利用已有的科学知识。科学计算则可以通过数学建模直接利用前人总结的物理规律,从而加速模型的学习过程。如同一个学生,一方面需要大量做题提升熟练度,另一方面也要总结规律提升学习效率。

科学智算可以利用前人总结的经验与知识,加速世界模型的学习过程。然而,完全依赖已有知识体系也可能限制创新。过多依赖已有知识体系存在风险,可能会忽视一些新的、未知的规律。因此,在世界模型与科学智算的融合过程中,需要在利用已有知识和探索新知识之间找到平衡,类似于强化学习中的利用(exploitation)—探

索(exploration)问题。在融合世界模型与科学计算的过程中,需要平衡利用已有知识和探索新知识的关系。过度依赖利用已有知识可能导致模型陷入局部最优,而过度探索则可能导致效率低下。因此,在实际应用中,需要设计合理的机制,确保模型既能充分利用已有知识,又能探索新的可能性。这方面尚存大量研究空间。还是以学生为例,无书自通很困难,但尽信书不如无书。

支撑世界模型的科学智算研究布局

世界模型作为人工智能领域的前沿研究方向,旨在通过模拟现实世界的动态变化,赋予AI系统更深入的环境理解与推理能力,其所需要内化的知识体系极其庞大复杂,在计算效率、计算方法以及新技术架构原理方面均面临诸多挑战。科学智算在支撑世界模型研究方面可开展的研究布局,主要包括计算效率提升、计算范式升级和科学原理发现等三个层面。

计算效率提升——直接映射。科学智算的第一个研究层次是计算效率的提升。通过监督学习,模型可以模仿已有的计算过程,从而实现高效计算。例如,在物理模拟中,传统的有限元方法虽然精度较高,但计算成本高昂。通过使用监督学习,可以训练一个神经网络模型来近似有限元方法的计算结果,从而在保证一定精度的前提下大幅提高计算效率。这种方法的核心在于利用已有的数据和模型,通过学习和优化,找到更直接高效的输入输出映射。

计算范式升级——模式替代。科学智算的第二个研究层次是计算范式的升级。近年来,一些基于AI的新计算模式逐渐兴起,如AlphaTensor和图计算等就属于此类。AlphaTensor通过深度学习算法优化矩阵乘法的计算过程,并找到了新的张量乘积计算模式,改变了原有计算路径,显著提高了计算效率。图计算则利用图结构的特点,高效地处理复杂关系数据,尤其是社交、通信、电网等拓扑数据。这些新的计算模式不仅提高了计算效率,还为解决复杂的科学问题提供了新的思路。例如,在化学分子结构预测中,图神经网络可以更好地捕捉分子之间的复杂关系,从而提高预测的准确性。

科学原理发现——知识探索。科学智算的第三个研究层次是科学原理的发现。事实上,几乎所有的科学原理都可以用语言来描述,通过自然语言处理技术,模型可以从大量的科学文献和实验数据中提取信息,发现新的规律和知识,同时结合原生多模态的各层级编码对齐技术,有望在复杂科学原理方面取得进一步突破。例如,有研究通过分析大量的化学实验数据和文献,可以发现新的化学反应机制或材料性

质;或者通过符号推理,发现新的科学公式及原理。这种方法的核心在于利用人工智能技术的泛化能力和学习能力,从海量数据中挖掘出有价值的信息,形成内化知识后,结合因果推理和逻辑决策,推动发现新知识。

融合科学智算的世界模型 赋能新型电力系统

电力系统底层数理规律体系完备。电力系统是一个复杂的物理系统,其运行和发展蕴含大量底层数理规律,而且自第二次工业革命发展至今,其原理体系已经比较完备。从电力的产生、传输到分配和使用,每一个环节都受到物理定律和工程原理的约束。例如,电力传输过程中的电磁感应定律、电力系统的稳定性分析等,都是基于经典物理学和数学理论的。这些底层数理规律为世界模型与科学智算的融合提供了坚实的基础。

在新型电力系统对世界模型的需求方面,新型电力系统面临着诸多挑战,如分布式能源的接入、电力市场的复杂性、极端天气条件下的应急响应等。这些场景需要一个具备普适知识的世界模型,能够快速适应不同的环境和任务,在面临未见情形时也可以通过智能涌现,正确完成决策,或者按照世界模型的专业说法,可以称为反事实推理。例如,在电力应急调度中,世界模型需要能够准确模拟出不同故障场景下的电力系统运行状态,并在从未出现的复杂连锁故障情况下提供比人类专家最优的调度方案。在配网智能规划中,世界模型需要预测不同社会发展阶段下的电力负荷变化以及拓扑结构和设备需求。这些需求都要求世界模型具备强大的学习能力和适应能力。

关于世界模型与科学智算结合的典型场景,在变电站智能运维方面,变电站是电力系统的重要组成部分,其运维效率直接影响电力系统的安全性和可靠性。通过世界模型与科学智算的结合,可以构建虚拟的变电站环境,全方位模拟乃至生成设备的各种运行状态和故障模式。利用科学智算中的计算效率提升技术,可以快速分析设备的健康状态,并预测潜在的故障风险。同时,通过计算范式的升级,可以优化设备的维护策略,提高运维效率。

在电力应急调度方面,在极端天气或突发事件下,电力系统的应急调度至关重要。世界模型可以模拟不同故障场景下的电力系统运行状态,为调度人员提供决策支持。科学智算中的科学原理发现技术可以挖掘电力系统在应急状态下的潜在规律,从而优化调度策略。例如,通过分析历史数据和实时数据,模型可以发现电力设备在极端条件下的潜在连锁故障失效模式,并提前制定应对措施。

在配网智能规划方面,随着分布式能源的大量接入,配网的规划变得更加复杂。

世界模型可以模拟不同负荷增长情况下的配网拓扑结构和设备需求,整合地理信息、负荷数据和设备性能等多种模态的数据;科学智算则可从原理层面考虑中长期电力系统的演进规律,从而为配网规划提供更准确科学的预测和优化方案。例如,通过分析不同区域的负荷增长趋势和分布式能源的接入情况,模型可以优化配网的拓扑结构,并结合城市规划等多方面信息,给出最优规划方案,提高供电可靠性和经济性。

关于科学智算与世界模型融合的具体技术路线,在工具调用层次,科学智算技术被作为工具集成到世界模型中。例如,利用科学智算中的优化算法来解决世界模型中的计算问题,或者使用科学智算中的数据处理技术来预处理世界模型的输入数据。这种层次的融合相对简单,但能够显著提高世界模型的计算效率和数据处理能力。

在简单耦合层次,科学智算与世界模型之间存在更紧密的联系。例如,科学智算模型可以为世界模型提供更准确的物理规律描述,世界模型也可以为科学智算模型提供更丰富的训练数据。这种层次的融合能够提高模型的适应能力和泛化能力,使其更好地应对复杂的电力系统场景。

在深度融合层次,科学智算与世界模型完全融合,形成一个统一的智能系统。这种系统不仅能够模拟电力系统的运行状态,还能够自动发现新的科学原理规律,并用来优化具体的应用策略。例如,通过结合强化学习、因果推理、具身智能等技术,深度融合科学智算的世界模型可以在模拟环境中自主学习和优化电力系统的运行策略,并与实际系统互动,给出可解释的控制策略,从而实现完全智慧化的管理,真正满足大电网未来“自动驾驶”的需要。

世界模型与科学智算的融合为新型电力系统的发展提供了新的机遇和挑战。通过优势互补和有机融合,世界模型可以更好地模拟电力系统的复杂行为,而科学智算可以加速模型的学习和优化过程。从计算效率提升到计算范式升级,再到科学原理发现,科学智算的发展有望为世界模型的构建和应用提供强大支撑。在新型电力系统的应用场景中,世界模型与科学智算的结合有望进一步提高电力系统的智能化水平,为电力系统的安全、可靠和高效运行提供保障。未来,随着人工智能技术的不断发展,世界模型与科学智算的融合将为新型电力系统的发展带来更多实用工具与创新机遇。

(作者系南方电网数字电网研究院有限公司教授级高工)



全面入市后，新能源四大问题待解

■陈皓勇 黄宇翔

在“双碳”目标引领下,新能源产业正成为传统能源企业转型主战场,展现出良好发展势头。截至2024年底,我国风电和太阳能发电装机容量分别达到5.21亿千瓦和8.87亿千瓦。

为深化新能源上网电价市场化改革,国家发改委和国家能源局于2025年2月联合发布《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》(以下简称《通知》)。《通知》明确,自2025年6月1日起,所有新投产的风电和光伏项目将全面参与电力市场交易,上网电价通过市场交易形成。同时,建立新能源可持续发展价格结算机制,对存量和增量项目实行分类施策,确保行业平稳过渡。

《通知》的实施,标志着我国新能源发电正式迈入全面入市时代,将有效促进新能源电力市场化消纳,减少弃风弃光现象。2024年,全国绿色电力交易规模已突破300太瓦时,同比增长超过50%,其中风电和光伏电力直接参与市场化交易的比例显著提升。此外,虚拟电厂等新技术的推广,也为新能源更好地融入电网提供了技术支撑。

未来,随着政策的深入实施和市场机制的不断完善,新能源产业将继续保持高速增长态势,成为推动能源结构低碳化转型的核心驱动力。

总体而言,“双碳”目标提出后,我国新能源政策大致经历了三个阶段。第一个阶

段是2020—2021年,在这一阶段,“双碳”目标提出,市场化机制逐步成型。第二个阶段是2022—2023年,在这一阶段,新能源市场化改革深化,消纳与储能机制优化。第三个阶段是2024—2025年,在这一阶段,新能源发电全面入市,市场化交易机制完善。

新能源全面入市后,从经济与市场角度而言,有以下四点关键问题需要解决。

一是新能源参与电力市场后的定价问题。在碳达峰碳中和背景下,新能源在我国电力系统中的占比不断提高,全面参与电力市场已成为必然趋势。然而,新能源的波动性、间歇性以及几乎为零的边际成本特性,给传统电力市场定价机制带来前所未有的挑战。《通知》要求“构建新型电力系统市场机制”“完善新能源参与市场的价格机制”,这就需要重新审视传统的电力定价理论和方法。

连续时间商品模型电力定价理论为解决新能源参与市场的定价问题提供了新思路。该理论将电力视为连续时间商品,通过黎曼积分和勒贝格积分方法,构建适应不同负荷曲线特性的定价机制。但随着大规模风电和光伏接入,电网负荷曲线呈现出更加复杂的非单调性和不确定性,挑战着现有模型的适用性。

目前的定价机制难以有效反映新能源的系统价值。一方面,在边际成本定价原则下,新能源的大量接入会导致市场价格下降,甚至出现“价格坍塌”现象;另一方面,新能源提供的容量价值、灵活性价值和

环境价值未能在现有市场中得到合理补偿。如何在连续时间商品模型框架下,构建既能反映新能源实际价值又能确保系统安全经济运行的定价机制,成为亟待解决的问题。

此外,《通知》明确要求“分布式新能源优先参与分布式市场交易”,并“推动新型储能独立参与市场”,这些新型市场主体的加入进一步增加了定价机制设计的复杂性。因此,需要探索构建多层次、多时间尺度的价格体系,在保障新能源公平参与市场的同时,合理分配系统调节成本,实现各类资源的价值发现和高效配置。

二是收益不确定性带来的投资回报问题。新能源全面入市后,固定补贴取消,企业必须依靠市场交易获取收益,而电价的高度波动使投资回报的不确定性大幅增加。新能源项目的盈利主要依赖中长期交易,现货市场套利和辅助服务市场,但现货市场价格受供需关系、天气条件等因素影响,可能出现极端低价甚至负电价,使新能源企业难以稳定回收投资成本。此外,由于新能源在容量市场中的角色尚未明晰,无法获得稳定的容量收益,导致投资回报周期拉长,影响新能源企业的融资能力。因此,未来需要优化市场机制,例如探索新能源的价格稳定机制,或通过更灵活的购电协议与储能结合,增强新能源企业对市场波动的抗风险能力。

三是市场出清计算方式的优化问题。现行电力市场的出清计算方式以边际电价为主,而新能源的零边际成本特性使其在

市场竞争中占据优势,但同时可能造成市场价格被压低甚至出现负电价。如何优化新能源的市场出清规则,使其既能保持竞争力,又不导致市场失衡,是当前需要解决的关键问题。一方面,可以探索新能源的分时段定价机制,在不同时段设定差异化价格,引导新能源企业合理调配发电;另一方面,可考虑采用能量块交易机制,以更精细化的出清方式匹配新能源出力特性,提高电网的整体效率。此外,新能源的大规模并网也对日前、日内市场的预测精准度和出清机制提出更高要求,如何优化新能源的报价机制,提高其市场适应性,将决定新能源在市场上的竞争力。

四是准入门槛与偏差考核方式的问题。新能源全面入市后,如何设定合理的市场准入门槛,确保新能源企业能够公平竞争,同时保证电力系统稳定,是市场改革中的关键议题。目前,一些地区对新能源市场准入提出较高要求,例如强制配储政策,要求新能源企业建设储能设施以提高出力稳定性。但如果准入门槛过高,可能导致部分新能源项目因投资压力过大而退出市场,进而影响新能源行业的整体发展。因此,需要平衡市场准入规则,允许不同类型的新能源企业根据自身条件选择与之相适应的市场模式。

与此同时,新能源发电的间歇性和波动性使其在市场中面临偏差考核,即预测发电量与实际出力之间的误差可能带来额外成本。目前,我国的电力市场偏差考核机制尚未完全适配新能源特性,如果

考核标准过于严格,可能导致新能源企业承担过高的偏差成本,影响市场积极性;但如果考核过于宽松,又可能影响电网安全。因此,未来需要优化新能源的偏差考核方式,例如,采用更科学的预测误差容忍区间,或者鼓励新能源通过储能、需求侧响应等方式降低偏差。同时,是否可以引入灵活性资源交易机制,让新能源企业通过市场手段而非行政考核来优化自身的偏差管理,也是未来值得探索的方向。

随着“双碳”目标的推进,我国新能源产业已从政策支持阶段逐步迈向市场化、规范化的成熟阶段。《通知》的出台标志着新能源全面入市时代已经到来,市场化交易机制正在不断完善。

面对新能源全面入市后的挑战,从定价机制重构到投资回报保障,从市场出清优化到准入门槛考核,都需要政府、企业与学界共同努力,构建更加公平高效的电力市场体系。市场机制设计应充分考虑新能源的特性与价值,在保障系统安全的同时,合理引导新能源投资与消纳。

未来,随着技术进步与政策完善,我国新能源产业将沿着更高质量的轨道发展。通过建立公平透明的市场规则和合理的价格机制,新能源与传统能源将实现优势互补、协同发展,为实现“双碳”目标和生态文明建设贡献力量。

(陈皓勇系华南理工大学电力经济与电力市场研究所所长、发展中世界工程技术院院士;黄宇翔系华南理工大学电力经济与电力市场研究所研究员)