

论 见

近年来,生成式人工智能浪潮席卷全球,其强大的内容生成和人机交互能力正深刻改变着社会面貌。在军事领域,大模型被视为未来战争的一个引擎,世界军事强国竞相投入研发。利用人工智能在最短时间,根据战场态势生成缜密的作战方案,成为许多作战指挥机构的追求。然而,与民用领域的快速渗透不同,生成式人工智能,距离在军事领域全面深度应用,依然面临着一系列严峻挑战。

大模型在推进人工智能发展上“自带光环”,但其在军事领域的应用却面临诸多困境,集中体现在“不好用”“不能用”“不敢用”三大困局。这些困局并非偶然,其根源与支撑生成式人工智能发展的核心要素在军事场景下的“水土不服”密切相关。

大模型离『中军帐』还有多远

■张静何焱

一是“不好用”之困:数据预训练的军事瓶颈。生成式人工智能核心在于,基于海量数据的强化学习预训练。然而,军事领域面临现代化实战经验数据匮乏的窘境。大量数据来源于日常训练和演习,其真实性、复杂性和对抗性与真实战场存在差距。更重要的是,与民用领域拥有海量标注数据不同,蕴含丰富作战知识的军事数据,比如作战文书往往价值高、体量小,且缺乏系统化的人工标注。这导致数据的可用性、可解读性差,难以支撑大模型进行有效的专业学习。数据体量的悬殊,极易引发模型“退化”“变笨”或输出不专业结果,难以理解和运用“军语”,缺乏“军味”,使得一线作战人员感觉“不托底、不靠谱”。

二是“不能用”之忧:交互调优与可解释性难题。大模型需要通过频繁的开放式交互训练不断优化参数,以适应高复杂度、强专业性的领域。在军事领域,开展如此大规模、高质量的交互调参工作难度和工作量巨大。更关键的是,大模型本质上是“黑盒模型”,其内在逻辑难以分解,输出响应中常出现“幻觉”,即“答非所问”,甚至无中生有。这与军事行动对高度可解释性、确定性、可靠性的严苛要求形成根本矛盾,指挥员难以信任一个无法清晰理解其决策逻辑的系统。此外,大模型高昂的硬件运维成本和技术门槛,也使其难以在一线部队便捷部署和维护。

三是“不敢用”之虑:互信成本与安全保密鸿沟。当前生成式人工智能主要在低互信成本的民用领域推广。军事领域最大的应用障碍之一,便是伦理与安全问题。技术复杂性和信息不透明性导致用户对输入输出间的因果关联难以把握,结果无法完全掌控,在涉及生死的军事决策中风险极高。同时,驱动大模型所需的专业化、综合性军事数据具有极高的敏感性。若照搬通用领域的数据汇聚模式,极易引发知悉范围失控、密级管理失序等重大安全保密风险,触碰军事领域红线。这使得部队对引入大模型心存顾虑“不敢用”。

面对军事智能领域的诸多难题,世界多国研究团队正在加速探索破局路径。比如,有的研究团队综合运用知识图谱等技术,破解了相关技术矛盾。然而,这仅仅是破冰之举。

正如民用领域的成功依赖于数据、算力、算法和交互环境的共同演进,军事领域生成式人工智能的成熟应用,同样需要在高质量军事数据基础设施建设、专用算力支撑、安全可控的多源交互环境构建以及法律道德规范等方面持续投入,厚积薄发。唯有攻克这些核心难题,生成式人工智能才能真正成为值得信赖的“中军帐”智慧引擎,为打赢未来战争提供坚实支撑。

监测数据显示,2025年5月,地球大气的月均二氧化碳浓度达到430.2ppm。这一数值是自1958年科学家开始系统测量以来的最高值。二氧化碳浓度年均增长量也在不断攀升,仅2024年年度增长量就达到了3.58ppm,创下历史新高。

在世界各地,二氧化碳浓度上升的影响正在显现:2025年7月,全球平均地表气温为16.68摄氏度,较工业化前(1850年至1900年)水平高出1.25摄氏度;北大西洋加速变暖,导致飓风季提前且强度增加;格陵兰冰盖正在加速融化,年消融量较21世纪初大幅增加;亚马孙雨林的年汇碳能力不断下降……

碳捕集与封存技术——

绿色低碳又添新动能

■董浩 卫怡博



我国海上首个百万吨级二氧化碳封存工程。

新华社发

高技术前沿

把二氧化碳永久“封存”起来

二氧化碳是导致全球变暖的关键性因素。碳捕集与封存技术,就像一套精密的免疫系统——先搜捕二氧化碳,再通过特殊管道将它们送至地下,最后用地质手段将其永久“封存”起来。

在工业排放的第一线,火力发电厂和钢铁厂的烟囱正在被装上高科技“口罩”。这些巨大的“选择性吸附系统”,采用最先进的胺液吸收技术,能够从滚滚浓烟中精准捕获二氧化碳。中国陕西的锦界电厂使用碳捕集与封存技术后,自投运以来,每年预计能拦截15万吨二氧化碳。

二氧化碳分子被捕集后,即将开始它们的地下之旅。在美国北达科他州,一家能源企业计划铺设连接5个州共4000多公里的二氧化碳输送管道。这些管道将连接57家乙醇工厂,把发酵过程中产生的二氧化碳压缩后输送到北达科他州,永久封存于地下。不过这种高压运输并非没有风险。此前,美国密西西比州一段老旧管道破裂,导致大量二氧化碳泄漏。高浓度二氧化碳致使45人住院,200余人被疏散——这更凸显了基础设施更新的重要性。

在大西洋的另一边,挪威的“北极光”项目选择用容量达7500立方米的巨型船舶,将液态二氧化碳运输到“北极光”封存设施中,然后注入挪威西海岸外约100公里处、海床以下2600米的地层。冰岛将二氧化碳溶解成酸性溶液后注入玄武岩层,一段时间后就能将其转化为永恒的碳酸盐矿物。

在这场与二氧化碳分子较量的历程中,碳捕集与封存技术就像为地球建造的人工肾脏。从中国锦界电厂的烟气捕集,到冰岛将二氧化碳变作永恒之石,人类正在重塑碳循环的轨迹。在这场关乎人类命运的科技征途中,每一个百分点的捕集效率提升,每一公里管道的安全运输,每一吨二氧化碳的成功封存,都在为我们的未来积累希望。

为全球气候治理贡献中国方案

在全球应对气候变化的浪潮中,中国展现了令人瞩目的发展成就。据报道,从2021年至2024年,我国

规划运行的碳捕集与封存工程由约40个发展至约120个,涵盖电力、油气、化工、水泥、钢铁等多个行业,数量成倍增长,碳捕集和回注能力快速提升。

中国在碳捕集与封存领域取得的成就,得益于系统性的国家战略布局。政策层面,国家发改委、科技部、工业和信息化部等部门出台了《绿色低碳先进技术示范工程实施方案》,加大对碳捕集与封存项目的支持力度。技术标准方面,我国正在加快推进相关标准建设,国家标准《碳捕集、利用与封存(CCUS)项目温室气体减排量化和核查技术规范》公开征求意见,有利于准确评估碳捕集与封存项目减排总量,促进相关项目健康发展。市场机制上,全国碳市场创新性地将碳捕集与封存减排量纳入交易体系。华润电力2024年共出售252万吨盈余碳配额,实现收益2.4亿元,为行业商业化提供了可复制的成功案例。“政策—标准—市场”三位一体的协同推进模式,彰显了中国在碳中和目标下的制度创新优势。

中国在碳捕集与封存领域开创性地构建了“三联动”发展新模式。在产业协同方面,宁波石化园区创新性地将捕集的二氧化碳直接供应周边光伏企业用于硅料生产,实现了碳资源的循环利用;在区域协作方面,粤港澳大湾区系统性地打造了涵盖捕集、运输、封存和监测的全产业链集群;在国际合作方

面,通过“绿色丝绸之路”倡议,中国向共建国家输出了成熟的碳捕集与封存设备和技术标准。这种立体化的协同发展模式,既体现了中国在碳中和和技术路径上的独特思考与实践,也为全球气候治理贡献了中国方案。

中国在碳捕集与封存领域的快速发展,不仅标志着全球气候技术竞争格局的重大转变,更深刻影响着全球碳中和进程的实施路径。中国通过系统性政策支持、技术创新和产业协同构建的碳捕集与封存生态,为发展中国家探索经济可行、技术可靠的碳中和和技术路线提供了重要范本。这一突破性成就打破了发达国家在气候技术领域的长期垄断。更重要的是,当欧美在碳捕集与封存领域陷入政策摇摆和技术路线之争时,中国的稳定推进为实现《巴黎协定》相关目标争取了关键窗口,也重新定义着全球气候治理中的技术领导力标准。

这场静默的技术革命,正在改写人类应对气候危机的战略版图。

气候工具箱中的“最后一招”

在全球应对气候变化的行动中,碳

捕集与封存技术始终伴随着争论。有人认为这项技术是实现碳中和的关键利器,也有人认为它只是代价高昂的权宜之计。

之所以有这样的争论,首先是因为碳捕集与封存技术的成本问题。传统工业源的碳捕集成本在每吨50至120美元之间波动,而直接从空气中捕集二氧化碳的成本则高出数倍。以瑞士工厂为例,尽管技术不断进步,其捕集成本仍维持在每吨600至1000美元,距离大规模商业化还有一段距离。

封存环节也存在技术隐忧。通过计算机模拟评估,虽然二氧化碳泄漏的概率极低,一旦发生就可能引发地质灾害。

更深刻的争议在于碳捕集与封存技术的社会影响。国际能源署指出,碳捕集与封存技术在钢铁、水泥等难减排行业具有不可替代性,但需避免成为化石能源扩张的借口。

面对挑战,科学家们正在开辟新的技术路径。碳利用技术已经展现出巨大潜力。国内首套“火电厂二氧化碳化学链矿化利用CCUS技术研究与示范”项目,将二氧化碳转化为碳酸钙固体,实现长期稳定固碳,具有较高的经济价值和广泛的应用市场;华能集团研发和投运了我国首座大型超临界二氧化碳循环发电试验机组,循环利用二氧化碳

驱动发电机发电;我国科研院所和企业开展了大量二氧化碳制乙烯、乙酸、甲烷等化学品相关的研究,试图将二氧化碳“变废为宝”。

除了加快技术发展,中国同时也注重综合施策。

国际上,通过“一带一路”倡议将先进技术共享。前不久,中国石油首个CCUS国际创效项目《印度尼西亚佳步区块Gemah油田二氧化碳驱可行性研究》顺利通过验收,标志着我国在碳捕集、利用与封存领域的技术实力得到国际认可。

在国内,注重技术与民生相结合。内蒙古鄂尔多斯项目创新性地将封存的二氧化碳用于大棚蔬菜种植,不仅能使农产品增产,还能减少病虫害和农药使用;在甘肃等偏远地区建设分布式碳捕集、利用与封存设施,通过“碳收益”机制助力当地发展经济,实现了环境效益与经济效益的双赢。这一系列实践,展现了中国在碳减排领域的综合解决方案和务实创新精神。

正如联合国政府间气候变化专门委员会强调的:“没有碳捕集、利用与封存,几乎不可能实现二氧化碳净零排放——但必须与减排并行,而非替代。”碳捕集与封存应该被视为气候工具箱中的“最后一招”,而非放任排放

量子“心跳”:精密观测作战脉动

■叶玉伯 谢涵宇

的内部电子在量子态间跃迁时,吸收或释放特定频率电磁波的固有特性,实现精准的时间基准功能。这种频率由宇宙基本规律决定,成为天然的超稳节拍器。当科学家通过微波精密“询问”并锁定这种原子共振,就获得了超越任何机械装置千万倍的终极计时源。这种源于量子世界的稳定“心跳”,为整个战场建立了无可撼动的时间标尺。

然而,要让实验室的杰作适应炮火连天的战场,技术必须完成尺寸、耐受和抗干扰方面的三重蜕变。

原子钟在尖端微纳加工技术驱动下,尺寸已从房间大小压缩至极小。芯片级原子钟尺寸,已缩小到仅16立方厘米,功耗低于150毫瓦。

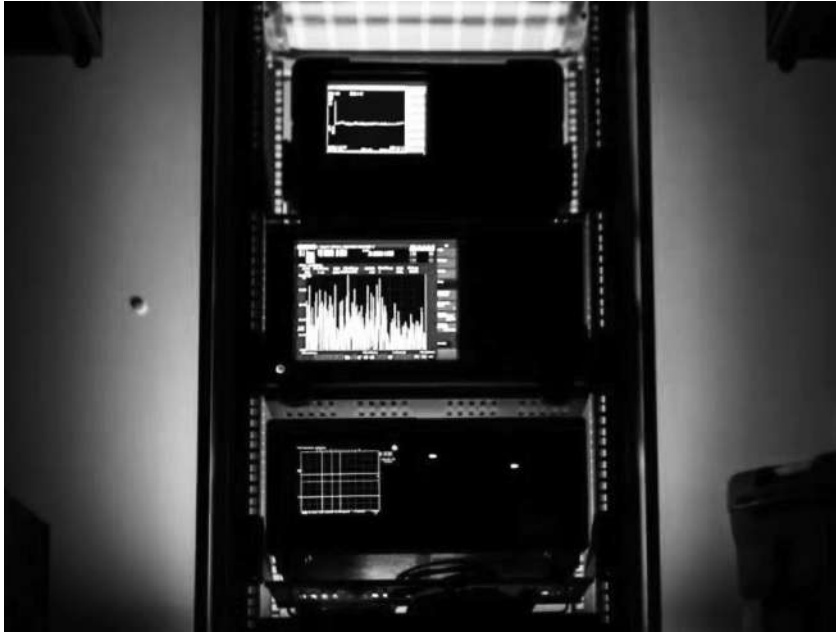
耐受性方面,科研人员采用微晶玻璃、碳纤维复合材料等特殊材料构建的原子钟核心,既能耐受-55℃至85℃的剧烈温变,又能承受导弹发射时超过30000g的瞬时冲击。

抗干扰方面,面对更隐蔽的威胁——

战场电磁迷雾,原子钟布下多重防线:多层高导磁合金屏蔽层将99.999%的外界电磁干扰隔绝在外。原子钟内置的超敏感锁环系统如同精密护卫,能在短短10毫秒内捕捉并纠正万亿分之一秒的微小时间偏移,确保原子钟在强电子干扰风暴中,输出信号依然达到严苛的军用相位噪声标准。

不过,当前的现实挑战依然严峻:这类末端时钟的月累积误差仍停留在微秒级,难以支撑全天候高精度作战;单兵装备和制导弹药的引信依然无法内置可靠原子钟源;更棘手的是对卫星校准的依赖,一旦卫星信号被压制,即便是核心节点携带的高精度铷钟,其内部频率漂移也会在数小时内导致授时精度大幅劣化,距离无外源辅助月误差低于100纳秒的理想目标仍有差距。

对此,唯有不断实现技术突破,无形的时间秩序才能持续成为战场上的力量倍增器,整个作战体系才能如精密校准的机器一样高效运转。



原子钟科研设备运行场景。

资料图片

热点追踪

2025年6月19日,北大西洋,英国皇家海军战舰甲板上,全球首个部署于作战舰艇的冷原子钟在剧烈摇摆与盐雾侵蚀中,持续输出万亿分之一秒级时间信号。这项由Aquark量子技术公司研发、英国国防科学技术实验室支持的核心装备,首次验证了量子计时技术在高动态战场环境中的实战可靠性,为不依赖卫星构建全域作战时间基准迈出关键一步。

现代战争胜负往往决定于毫秒之间。超声速战机编队突防需要机身动作时间误差小于十毫秒;分散部署的导弹要形成多轴同步杀伤,弹道必须在微秒尺度上对齐;反隐身雷达网依靠多点纳秒级的时间差精确定位……协同作战一旦缺乏统一时间基准,就如同一场失去指挥的交响乐,火力会相互干扰甚至误伤友军。建立全域覆盖、抗毁可靠的时间秩序,已成为现代战争的生命线。

解决这一关键点的核心力量,来自原子世界。原子钟利用铯、钡等元素