

全球可控核聚变能研发不断取得重要进展,技术路线日益多元,创新主体竞相涌现

# “人造太阳”,何时点亮万家灯火

吴宜灿



能源是人类社会发展的永恒主题。近年来,有着“人造太阳”之称的可控核聚变能研发在全球范围内不断取得重要进展,技术路线日益多元、创新主体竞相涌现,加速从科学可行迈向工程验证。在这一领域,中国研究水平持续提升、国际影响力稳步增强,美国、欧洲、日本等国家和地区也在持续加大投入,力求在新一轮能源革命中占据主动。同时也应看到,可控核聚变能从实验室走向电网仍面临不少物理、工程与经济挑战,其商业化仍是一项需要长期投入的跨代工程。

## 模拟太阳发光发热机制——

努力让这团“火球”悬浮在空中,不碰壁、不熄灭,保持长时间稳定约束、高性能运行

什么是“人造太阳”?太阳之所以发光发热,是因为其核心在极高的温度和压力下,将氢原子核“揉”在一起,聚合成氦原子核,并在此过程中释放出巨大能量。由于模拟了太阳内部这种释放能量的机制,可控核聚变能被形象地称为“人造太阳”。它的主要燃料之一——氘可从海水中提取,资源丰富;运行过程既不排放二氧化碳,也不会像传统裂变核能那样产生大量高活性、长寿命的放射性废物。这一技术运用一旦取得突破,有望为人类提供持续稳定的清洁能源。

不过,人类要想在地球上复制这种能量释放过程,难度极大:需要把燃料加热到上亿摄氏度,让物质变成一种由大量带电粒子组成的特殊状态,叫作“等离子体”。但是任何固体材料都无法通过直接接触来长期承受这种高温。怎么办?科学家想出了各种妙招,一种常见思路是让这团“火球”悬浮在空中,不碰壁、不熄灭。

几十年来,主流的方法是用强大的磁场把等离子体“托”起来,像一个无形的笼子把它稳稳包住。这种聚变方式被称为磁约束聚变,其中典型的一类装置叫“托卡马克”。自1988年启动设计,当前汇聚七方30多国、正在法国南部建设国际热核聚变实验堆(ITER)是规模最大、最具标志性的托卡马克工程。2023年,日本与欧盟合建的JT-60SA装置建成并实现首次等离子体放电,法国的WEST装置于2025年实现1337秒等离子体持续运行。我国的“东方超环”和“环流三号”也是这类装置的代表,2025年“东方超环”实现上亿摄氏度、1066秒的稳态高性能等离子体运行,“环流三号”实现离子温度1.17亿摄氏度、电子温度1.6亿摄氏度运行。

对磁约束路线而言,核聚变发电的前提是,这种反应能够在高参数下持续稳定地进行,而不是像“放炮仗”一样瞬间熄灭。上述一系列突破,体现了高温等离子体在长时间稳定约束、高性能运行等方面的成果,这是未来聚变电站实现连续稳定运行的重要基础,“人造太阳”的技术可行性正在被一步步证实。

图①:在北京举办的2026年中国国际核工业展览会上,国际热核聚变实验堆模型。

唐克摄(影像中国) 图②:风神核聚变中子源大型科学装置“麒麟光一号”。 风神核供图

## 多元技术路线并行——

有的依靠强磁场将高温燃料托住稳住,有的利用激光或电流对燃料瞬时挤压加热

如今,通往“人造太阳”的技术路径更加多元,多种聚变路线正并行推进、竞相突破。

与托卡马克这一大型复杂系统路线相比,场反位形等装置更紧凑、迭代更快的新技术路线受到越来越多关注。它不依赖托卡马克通常采用的中心螺线管结构,而是使等离子体能够自组织形成闭合的磁场结构,可在相同磁场条件下努力实现更高压强,这为装置紧凑化和降低单位功率建设成本提供了可能。2023年,美国赫利昂能源公司与微软签署全球首份面向未来商业的聚变购电协议。今年2月,该公司宣布其原型机“北极星”已成功观察到氦氖聚变信号,这意味着装置内发生了可测量的聚变反应。美国TAE技术公司也在利用数字仿真和人工智能持续优化等离子体控制,推进其商业化路线图。

仿星器则是一种外形似麻花的磁约束装置,其磁场结构复杂,理论上更有利于把高温等离子体中的粒子和能量更长时间地“留住”,从而提升装置持续运行能力。2025年,德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所的W7-X装置在长脉冲(即较长时间持续放电)运行条件下创造了三乘积(对等离子体温度有多高、密度有多大、能量保持多长时间这三项指标的综合评价,被视为衡量聚变装置性能的核心标准)世界纪录,并将高性能等离子体状态维持了43秒,这表明仿星器在长时间稳定运行方面展现出越来越突出的潜力。

另一大类重要思路则是在极短时间内把燃料迅速压缩、加热,从而触发聚变反应,这就是惯性约束聚变。其中最受关注的一种实现方式,是利用高能激光来驱动燃料内爆。2025年,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的国家点火装置(NIF)利用192束高能激光同时轰击一颗装有不足1毫克氘氚燃料、比芝麻还小的靶丸,在数十亿分之一秒内将其压缩到比太阳核心还致密的状态,诱发聚变反应。一次实验释放的能量达到8.6兆焦,约相当于一台1000瓦电暖器连续工作2个多小时所消耗的电能。这次实验结果表明,聚变释放的能量不仅超过了注入靶丸的激光能量,这种能量增益更进一步提高到4倍以上,再次验证了激光聚变点火的可重复性,标志着实验室点火研究推进到更高水平。



还有团队另辟蹊径,用电流产生的强大磁场“箍”住等离子体,像用无形的橡皮筋把它紧紧勒住,这种方法叫“Z箍缩”。美国聚变能源技术公司“扎普能源”近期宣布,其最新一代“FuZE-3”装置在等离子体压强等关键指标上取得突破,提升了Z箍缩等离子体的稳定性,也展现出这一路线在推动装置紧凑化方面的潜力。

这些不同路线就像通往山顶的不同路径:有的依靠强磁场将高温燃料托住、稳住,尽量避免与装置壁面接触;有的利用激光或电流在极短时间内对燃料瞬时挤压、迅速加热。这种多元并行的探索,为解决可控核聚变技术在物理、工程等方面的挑战拓展了更多空间。

## 创新生态更加活跃——

国家主导、国际合作、商业参与汇聚合力,中间技术和平台“沿途下蛋”加快产业运用

当前,全球可控核聚变创新生态正在发生深刻变化:国家主导、国际合作、商业参与等各方力量正加快汇聚,推动核聚变能研发进入新的活跃期。ITER作为全球规模最大的能源科技合作项目,汇聚了多国科研力量,共同探索托卡马克路线下聚变反应的工程可行性。美国、欧洲、日本等国家和地区也在不断加大投入,支持核聚变能技术研发。我国核聚变能研究已实现由“跟跑”向“并跑”、部分方向进入国际前列,完备的工业体系优势也正在为核聚变能工程化提供有力支撑。

与此同时,商业核聚变企业快速涌现,社会资本纷纷进入,这是全球可控核聚变能创新生态变化的一个重要表现,有望加速推动可控核聚变能技术更快走向实用验证。在这一进程中,人工智能正成为点亮“人造太阳”的关键新变量。人工智能有望在海量

材料与结构方案中,加速筛选耐极端环境的候选材料,也可为等离子体的状态识别、预测预警与辅助控制提供新工具,帮助提升控制的及时性与精度,并为探索新的结构布局和运行模式打开更多可能。

总体而言,当前可控核聚变能研究整体上仍处于从科学可行向工程验证跨越的关键阶段。NIF等最新进展更多体现为实验室尺度下点火与燃烧能力的提升,而非电网侧稳定供能的实现;ITER最新调整后的时间表也表明,其研究运行预计到2034年启动、氦氖实验运行预计到2039年展开,庞大复杂的系统集成难度由此可见一斑。同时,国际聚变研发重点正逐渐转向更贴近工程实现的关键问题,如等离子体稳态运行、氦燃料自持循环、耐极端环境材料、装置安全性与经济性等,这些仍是国际普遍公认的难点和挑战。可控核聚变能不是单纯的高温参数或者长脉冲实验,其目标是打造一种全寿命、安全、可靠的能源系统,其商业化路径必然是多方积累、逐步验证的长期过程。

核聚变能走向产业化,不应等待最终电站的建成。事实上,在当前产业化路径上,一些聚变相关的中间技术和平台已开始用“沿途下蛋”的思路打开现实应用空间。例如我国风神核团队研发的高性能聚变中子源等相关技术,已在无损工业检测与安全、高端医疗健康等领域实现了产业转化,取得了显著应用成效。这种“以途促终”的模式,有助于形成技术演进促进产业成长的良性循环,也可以让更多公众了解核聚变能技术的现实价值。

从实验室点火到电网稳定供能,可控核聚变能还需跨越漫漫长途。这是一项跨越代际的探索,更是综合国力的竞争。相信在全球科研人员的不懈探索下,“人造太阳”的光芒终将照亮未来。

(作者为中国科学院院士、国际核能院院士)

## 科技大观

在日常生活中,很多人都有这样的感受:通过艰苦努力才完成任务,比轻易获得的同类事物更让我们感到满足,比如一次艰难备考、自己组装产品等。越难得到越珍惜,为什么会这样?在经济学和心理学中,这种因投入时间和金钱而影响价值判断的现象被称为“沉没成本”效应。近期,美国斯坦福大学医学中心科学家在《自然》杂志发表的一项研究,首次从神经科学层面揭开了“努力—快乐”的神经机制,让我们对“沉没成本”这一心理效应有了更深认知。

这项研究以小鼠为实验对象,设计了一套行为任务:小鼠需要通过反复将鼻子伸入指定孔洞(最多可达50次)或忍受轻微电击,才能获得一点糖水作为奖励。研究团队利用先进的神经成像技术,实时记录小鼠大脑伏隔核区域的神经信号变化,从而捕捉到“努力”与“奖赏”之间的神经生理学对话。

研究发现,当小鼠获得糖水奖励的瞬间,其大脑内“快乐分子”多巴胺的释放量与之前付出的努力程度呈正相关。也就是说,付出的成本越高,获得回报时多巴胺的爆发就越猛烈。这种爆发式的快感会重塑小鼠的认知,让它以为这份回报格外珍贵。这就是“越难得到越珍惜”的神经基础。

这项研究有两大核心创新。第一,化学物质乙酰胆碱在脑中扮演着“记账员”角色。在付出努力的过程中,乙酰胆碱会像一个记账员一样,一笔笔记下所付出的努力,然后发出信号,告诉多巴胺:“这次来之不易,请多分泌奖励”,从而为即将到来的快乐“加码”。用一个形象的比喻,大脑里有两位“关键信使”:“快乐分子”多巴胺和“记账员”乙酰胆碱。乙酰胆碱负责记录我们有多“拼”,多巴胺则根据这份记录来决定给多少快乐奖赏。

第二,这种“努力—快乐”的调控并非发生在多巴胺的“生产工厂”,而是在其“最终投放点”——多巴胺轴突末梢完成。研究通过药物阻断和光遗传操控(利用光敏蛋白与特定光照,精准控制神经元活动的生物技术)等手段验证发现,即使抑制中脑(间脑与脑桥之间的部分)多巴胺细胞体的活动,努力与奖赏的关联效应依然存在;但如果阻断乙酰胆碱的信号,高努力带来的额外快乐就会消失,小鼠再也不愿意为回报付出更多。这说明,“努力—快乐”神经回路是精确且可干预的。

这一研究为“沉没成本”提供了坚实的神经学基础:当你付出得足够多,在获得回报的那一刻,大脑给你的愉悦感冲击也就更加强烈。你心里感知到的“更快乐”,可能只是大脑在为你努力的汗水买单,你付出的努力都被大脑神经系统一笔一笔地记录,让你产生“越努力越快乐”的心理体验。

这项研究的价值,不仅揭示了大脑“努力—快乐”的回路机制,对于我们从心理学上理解我们日常生活的决策行为也有不少启发意义。

首先,警惕“沉没成本”的神经陷阱。生活中,我们常陷入这样的困境:电影看了半小时觉得无聊,却因为“票都买了”而硬撑到底;一段感情早已千疮百孔,却因“在一起这么多年”而迟迟不肯放手。这项研究告诉我们,这些行为的根源在于对沉没成本和心理感知。理解这一点,我们就在决策时多一分清醒,当你纠结时,不妨停下来问问自己:我追求的究竟是这件事本身的价值,还是大脑为“努力”发放的补偿?

其次,别让“付出的努力成本”绑架理性判断。研究揭示了一个更深层的心理陷阱:大脑中“想要”和“喜欢”其实是两套系统。我们可能并不真的“喜欢”那个排队两小时才吃上的餐厅,但由于前期付出的成本太高,大脑会让我们极其“想要”完成这个过程。看清这点,我们就在重大决策中学会区分“我付出了多少”和“这对我还多少价值”,不被过往的努力干扰对未来的理性判断。

最后,善用“努力—快乐”机制,为真正的目标注入动力。既然大脑有“努力—快乐”的内在机制,那我们完全可以利用这一点,为自己真正坚持的事情设定合理的“难度阶梯”。比如,想培养健身习惯,可以给自己设置渐进式目标,让阶段性成就带来的多巴胺成为坚持下去的动力。

(作者为暨南大学管理学院副院长)

# 越难得到越珍惜,这其实很「科学」

李爱梅

## 创新汇

# 读懂植物的“求救信号”

本报记者 郭梓云 孔歌

在瑞士巴塞罗纳郊外的一座大型温室里,一只椋鸟悄悄落在叶片上,准备饱餐一顿。此刻,沉默的大豆植株其实并非毫无反应,它正释放出一连串急促的电信号,宛如在发送无声的求救电波——“哎哟,我受伤了”。

过去,这种“声音”人类听不见,也看不懂。近日,先正达集团研究团队与瑞士科技公司“维文生物信号”合作,在实时监测植物电信号的基础上,首次利用机器学习技术,成功破译植物被虫害侵袭时发出的“求救信号”。这项发表于《科学报告》等国际期刊的研究成果,意味着人类开始“理解”植物的语言,这不仅是植物生理学的重大突破,也为全球粮食安全提供了一把“数字钥匙”。“我们对植物的生长机制及其应对病虫害威胁的方式了解得越透彻,就越能帮助植物健康成长,从而保障粮食生产。”领导该研究团队的植物学家阿克·布赫霍尔茨在接受记者采访时表示,他们现在能够准确、实时地了解作物如何应对特定的环境挑战。

数据显示,全球每年因植物病虫害导致

的农作物损失比例高达40%,直接经济损失超过2200亿美元。以大豆为例,作为全球油料作物和植物蛋白的核心来源,每年有超过20%的大豆因病虫害问题减产。“其中一大挑战就在于,病虫害侵袭的隐蔽性。”布赫霍尔茨表示,比如拉丁美洲大豆田里常见的椋鸟,它们常常潜伏在大片豆田茂密的冠层隐蔽处。在椋鸟侵扰初期,对植物造成的损害微乎其微,因此很难及时发现它们。等到农民注意到大豆变黄时,虫害已蔓延开来,最佳防治时机往往已经错过。这种“识别滞后性”不仅导致减产,更迫使农民为控制虫害扩散而加大农药喷洒剂量,增加喷洒频次,加重了对土壤、水源的环境影响。

其实,科学家对植物电信号的探索已有150年历史。中国科学院植物学博士、科普作家史军表示,植物电信号并不神秘,任何生物在生命运转过程中都会产生电信号。当氢离子、钙离子、钾离子和氯离子在细胞膜内外移动的时候,就会带来细胞膜两侧离子浓度的变化。带电离子的移动恰如金属

导线中电子的移动,于是就产生电信号。当植物体受到干旱、低温、动物啃食等外界刺激时,会带动细胞膜两侧离子浓度的变化,进而产生电信号。这些信号通过植物体内输送水、矿物质和养分的组织通道中的离子流实现传播,这也是植物在细胞、组织间进行通信的最快机制之一。不过,面对植物发出的海量且极度复杂的电波数据,人们很长时间都无法真正理解这些信号的含义。布赫霍尔茨解释说,“人类处理不了这么大的信息量,这些信号交织在一起,就像嘈杂的电流声,我们以前根本不知道它们在‘说’什么。”

机器学习与人工智能技术的加入,为研究和破解植物的“求救信号”开辟了新路径。研究团队给大豆植株连接上精密的电信号监测设备。这些电信号被记录下来,随后被“投喂”给人工智能模型进行分析与解读。“这使我们能够搜索植物语言中表示‘我正遭受椋鸟攻击’的电信号模式。”先正达集团植物学家尤里安·弗里德里希说。

研究团队还对比监测了经植物保护产品处理过(比如喷洒植物保护产品)的大豆与未处理过的大豆的反应机制。结果显示,未受保护的大豆在遭遇椋鸟侵袭时,电信号瞬间变得剧烈且无序;而经过处理的健康植株,其信号则保持平稳。这意味着,通过记录植物的电信号,可以更准确地判断作物是否受到侵袭,从而提前数小时甚至数天发出预警。布赫霍尔茨认为,这一新发现有助于农技人员更早、更高效地干预和防范虫害,实现作物的精细化管护,并更有针对性、更可持续地施用农药。

当然,这项技术仍处于起步阶段。现阶段科学家只能确定几种胁迫类型,例如椋鸟啃食豆荚,或者线虫(一种微小的蠕虫)在土壤中啃食根部。布赫霍尔茨表示,“团队的中期目标是建立一个植物‘求救信号’数据库,以便进一步区分各种病虫害或干旱等影响植物健康生长的环境威胁。未来,我们希望能够破译植物的语言。”

如何分辨植物的“求救信号”,是进行虫害管控的关键。史军解释说:“这项研究的关键点在于研究团队通过数学模型,排除了光照、水分等环境影响因素,筛选出那些与昆虫侵害大豆相关的电信号。这就像破译了植物的摩斯密码——‘尖峰’次数越多,呼救越急,这让我们对植物的反应有了更清晰的理解,也为对抗虫害争取了宝贵时间。”

## 刷手机有多累?现在AI能算出来了

据新华社赫尔辛基电(记者朱昊晨、徐谦)长时间刷手机不仅“费脑”,而且“费手”。芬兰和德国研究人员最新开发出一款AI(人工智能)模型,可模拟人们使用智能手机时的肌肉骨骼系统负荷,分析怎么操作手机更省劲儿。

该模型基于智能手机触控记录与人体动作研究数据,可模拟人们使用手机时的动作轨迹,并评估相关动作的速度、精度及其对肌肉骨骼系统产生的负荷。模拟结果显示,一些操作确实更“费劲”,例如上下滑动、点击较小图标以及屏幕角落的界面元素时,往往需要花更多力气。研究人员认为,该模型为智能手机的使用研究和界面设计提供了新视角。开发者可以更早发现不太顺手的设计,开发出更符合人体工学、更舒适的人机交互方式。

## 阿根廷发现约7000万年前陆生蜥蜴化石

据新华社布宜诺斯艾利斯电(记者张铎、王钟毅)阿根廷国家科学与技术研究理事会日前宣布,该机构研究人员领衔团队在阿根廷内格罗河省发现一具约7000万年前的爬行动物化石,根据下颌骨和颅骨等结构特征将其归入蜥蜴目。阿根廷国家科学与技术研究理事会在一份声明中说,这是迄今发现的最完整的晚白垩世陆生蜥蜴化石,不属于任何已知的物种群,揭示了先前未知的南美洲蜥蜴进化谱系,为研究南半球大陆爬行动物的演化提供了关键证据。在此次发掘中,科学家借助微型计算机断层扫描技术,在不损伤化石的情况下对其解剖结构实现了微米级分辨率数字化重建。

本版责编:王慧 黄发红 孔歌 版式设计:汪哲平