中国科学报

CHINA SCIENCE DAILY

总第 9121 期　2026 年 11 月 20 日　星期五　今日 4 版

中国科学院主管　中国科学报社出版

国内统一连续出版物号 CN 11－0084　代号 1－82

主办：中国科学院　中国工程院　国家自然科学基金委员会　中国科学技术协会

听《中国科学报》　《中国科学报》官微　科学网 App　科学网官微

新浪微博 http://weibo.com/kexuebao　　科学网 www.sciencenet.cn



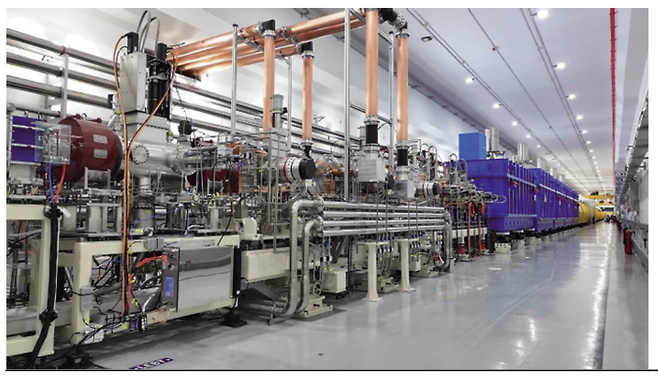
给核燃料发掘“新矿藏” 让核废料重新发电

■本报记者 叶满山 刁雯蕙

从广东惠州市区向东南驱车两小时，便来到惠东县黄埠镇。山海环绕下，国家重大科技基础设施加速器驱动嬗变研究装置（CiADS）正在加速建设中。这里，不仅承载了我国迈向一个“超级方案”——加速器驱动先进核能系统（ADANES）的关键一步，也见证着中国科学院与中核集团在科技创新与产业创新的深度融合（以下简称两创融合）。

ADANES 是一个由中国科学院原创性提出、被认为是核能领域“最具前景”的技术方案，目标是解决核裂变能大规模发展面临的铀资源瓶颈及废料处置难题。2017 年，在中国科学院先导专项支持下，方案完成原理验证。2021 年，ADANES 的工程验证平台——CiADS 启动建设，中核集团出资参与铅铋快堆建设。2024 年以来，作为装置建设单位的中国科学院近代物理研究所（以下简称近代物理所）开展燃料循环示范验证，并与相关央企加快推进再生燃料芯块和燃料组件研发合作，为后续百兆瓦工业示范装置落地与推广做好技术储备。

CiADS 总设计师、近代物理所副所长何源介绍，该装置如同给反应堆装上“外挂”，能够把乏燃料、贫铀变废为宝，有望实现核燃料“吃粗粮、吃干榨净”，CiADS 近百分百国产化，预计 2028 年完成示范装置建设。



强流质子超导直线加速器。　近代物理所供图

院企协同破解产研“两张皮”

实现“双碳”目标，核能是我国能源版图不可或缺的基荷能源。核裂变是目前人类能可控利用的能量密度最高的能源产生形式，受技术能力限制，目前真正能在现有商业压水堆里直接燃烧发电的原子核仅有铀 -235，占天然铀总量的 0.7%。因此，现有核电站对铀资源的整体利用率还不到 1%，而全球经济可开采的铀资源总量不足 800 万吨，我国铀资源对外依存度高达 80%以上。

同时，核电站卸出的乏燃料带有大量长寿命高放射性核素，放射性衰减周期长达数万年，核废料安全处置是全球核电国家共同面临的挑战。

“国外有一种观点，核废料先暂存，留给后代聪明人去解决，但我们想跳出传统思路，探索差异化的嬗变技术路线。”中国科学院院士、ADANES 项目总指挥詹文龙回忆立项初衷时说，ADANES 技术路线可将铀资源利用率提升 150 倍，放射性废物压减至千分之一。

不过，如何将实验室原理创新落地为大型工程，是这条技术路线必须面对的现实考题。

ADANES 是先进加速器与先进快堆深度耦合的复杂系统工程，也是闯入国际“无人区”的探索性任务，单凭科研院所或者产业单位一方都难以完成。

“科研不能闭门造车，科技创新要对接产业真实需求。”何源表示，作为国家战略科技力量更要着眼行业长远可持续发展，布局前瞻性、战略性技术储备，不能一味追逐短期产业收益。

2008 年，近代物理所与中核 401（中国原子能科学研究院）分别提出了相关大科学设施建设构想，经国家层面统筹整合，两份设想合并形成统一的项目建议书，并在 2013 年被列入《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2013—2030 年）》16 个优先发展项目之一。

两个单位各展所长、优势互补：近代物理所在核科学与核技术领域有数十年积淀，承担中国科学院未来先进核裂变能先导 A 项目，牵头加速器驱动次临界系统（ADS）、高功率靶、铅铋反应堆、先进干法分离等关键技术攻关。中核 401 建成我国首座钠冷实验快堆，依托“973 项目”建成启明星Ⅰ零功率系统。近代物理所为 CiADS 建设单位，中核 401 则作为参建单位，与前者为实现 ADANES 的目标携手前行。

十余年联合攻坚闯过重重难关

在院企协同合作模式下，中国科学院团队聚焦原理和系统创新、底层机理研究、关键核心技术攻坚；中核集团发挥大型核工程建设、核工业运行维护的产业实践优势。双方联合向强流超导直线加速器、高功率散裂靶、铅铋反应堆、高温干法燃料再生等全新技术领域发起冲锋。

中国科学院 2011 年启动的“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”战略性先导科技专项中，近代物理所与中核集团联合打造的启明星Ⅱ号零功率装置是重大成果之一，也是院企协同攻关的标志性成果。这台铅基临界 / 次临界双模运行的零功率装置，重点用于 ADS 反应堆关键实验数据研究。

2021 年，中核集团参与 CiADS 工程建设，标志着双方合作从基础实验攻关正式迈入大型工程协同建设的新阶段。

走进 CiADS 建设现场，300 米长超导加速器隧道、十余米高铅铋堆非核集成实验台架、要求严苛的超净装配车间，勾勒出大科学装置的轮廓。这套装置由高功率质子超导直线加速器、高功率散裂靶、铅铋冷却次临界反应堆三大板块构成。加速器将质子加速至约光速的 80%，轰击散裂靶产生海量外源中子送入次临界反应堆，同步实现发电、燃料增殖、核废料嬗变。

ADANES 采用具备安全优势的次临界运行模式，而加速器就是整套系统总开关，束流一旦停止输出，链式裂变反应即刻终止，即便全装置断电，依靠非能动空气冷却系统也可以带走衰变余热，保障堆本体安全。

这条技术路线没有国外完整建成运行的先例，攻关路上挑战重重。

何源回忆：“超导加速腔体要维持零下 271 摄氏度的极低温超导状态，运行在极高的电场下，一粒微小尘埃就可能造成部件性能失效，关键装配必须在极高级别超净间内完成。高功率束流传输要求束流损失控制到极低水平，每秒六亿亿级别的粒子流，只允许极少数粒子掉队，这曾被国际同行视作难以战胜的拦路虎。”

面对束流损失控制这一世界级难题，团队另辟蹊径，改变传统后端补救思路，选择在加速器前段识别、剔除状态不佳的粒子，只保留合格粒子向后传输，从源头上化解束流损失风险。关键装备国产化的道路同样充满考验，大到价值上亿的系统设备，小到器件、材料、线缆、传感器，都曾面临“卡脖子”的风险。保障超导加速器低温工况的核心设备——18 千瓦大型液氦制冷机曾一度受到海外限制。 （下转第 2 版）



研究提出 我国森林碳汇经营新思路

本报讯（记者李晨）森林采伐越少，储碳就越多吗？中国林业科学研究院（林草碳汇研究院）研究员刘世荣院士团队联合南京信息工程大学教授余振团队，通过整合第六次至第九次全国森林资源清查约 1550 万条单木观测记录，利用动态陆地生态系统模型（DLEM）构建了面向 2020 年至 2100 年的森林经营情景，系统评估了不同气候情景下优化采伐对森林碳储存、树木死亡和木材生产的长期影响。近日，最新研究成果在线发表于《国家科学评论》。

长期以来，减少采伐、保留更多活立木被视为森林保护的重要举措。然而，随着林龄逐渐老化，部分森林生长减缓、自然死亡损失上升，仅靠“少采伐”并不必然带来更高的长期碳储量。同时，我国木材消费需求较大，国内供给与消费之间仍存在缺口。

研究设置两种主要经营方式：基准情景（BAU）延续现有管理实践；优化情景（OPT）则根据森林年龄、功能区划和生态限制，调整采伐时间、强度与地点，将适宜的多功能森林纳入合理的木材生产范围。

研究表明，与延续现有管理方式相比，按照优化情景差异化采伐，在国家公园及严格保护区域不采伐、确保 2035 年国家自主贡献目标森林蓄积量达到 240 亿立方米以上的前提下，木材年均产量可由约 3.2 亿立方米提高至约 4.4 亿立方米，增幅达 38%。

在该优化情景下，若我国木材需求保持不变，国内木材产量可在 2050 年后满足国内消费需求；即使考虑未来木材需求持续增长，木材自给率仍有望从 59%提升至 81%。优化经营相对于基准经营，可使包含森林和木材产品等碳库在内的总碳储量提高 4.2%，约合 5.2 ± 1.6 亿吨碳。

研究建议，森林碳汇管理不能只关注当前森林活立木蓄积，还需全面统筹林龄结构、自然死亡及木材产品的碳储存；适时、适度、空间差异化的森林采伐有望实现木材生产与长期储碳的协同。

该研究为协调我国森林增汇与木材供给、完善森林可持续经营政策、实施森林质量精准提升工程提供了可量化的情景依据，对助力林草高质量发展、推进“双碳”战略实施具有重要参考价值。

相关论文信息：

https://doi.org/10.1093/nsr/nwag677

高空巨型“抓娃娃”机 如何厘米级“绣花”？

■本报记者 朱汉斌 通讯员 卢梦舟

你见过误差要求只有 3 厘米的巨型“抓娃娃机”吗？它的“爪子”是六七层楼高的港口起重机，钢丝吊绳长达 16 米，被抓起的“娃娃”是数十吨重的标准集装箱，却要在风雨飘摇的户外堆场里全年无休完成上百万次精准对位，精度相当于在 7 层楼高的地方把硬币精准投进地面存钱罐。这个此前被行业视作“几乎不可能完成”的任务，如今已在国内多个港口成为现实。

近日，香港科技大学（广州）教授杨俊团队联合东南大学、上海驭矩信息科技有限公司研发的港口轮胎式龙门起重机自主作业系统 Autane，登上《科学－机器人》封面。目前，超过 60 台“钢铁巨兽”在真实港口实现全天候无人作业，累计自主装卸超过 480 万个标准箱，保持零安全事故。



《科学－机器人》封面。　研究团队供图

难在“大”，更难在“软”

港口是中国制造的一张名片。全球前 10 座大型集装箱港口中，有 6 座在中国；中国港口集装箱吞吐量连续多年位居世界第一；中国制造的港口集装箱起重机占全球市场份额七成以上，出口至 100 多个国家和地区。但在“造港口、造吊机”领先之后，一个现实问题摆在眼前：这些巨型设备仍离不开人。

码头堆场里最忙碌的设备之一是轮胎式龙门吊（RTG）。不少干了十余年的 RTG 司机，把日常工作形容为高空“抓娃娃”：坐在离地 20 多米的驾驶室里，全程低头俯视下方集装箱。夏天，驾驶舱像密不透风的桑拿房；一个 8 小时作业班，司机往往不敢多吃饭，少喝水，尽量少起身走动。一天下来，很多人头晕目眩，颈椎、腰椎常年劳损。

“长期在高空保持高度专注，不少司机到 40 岁就不得不转岗。国内港口堆场规模持续扩张，谙熟 RTG 的司机缺口也在扩大。”论文第一作者兼共同通讯作者杨俊告诉《中国科学报》。他的解法是让起重机自己干活，但“自己干活”并不容易。

“这就像拖着一个十余米长的巨型机械，去做‘穿针引线’的工作。”杨俊解释说，集装箱标准长度 12 米，锁孔只有 8 厘米宽，落箱误差必须控制在 3 厘米以内，相当于在 7 层楼高的地方把硬币精准投进地面存钱罐，还要在户外风雨、光照变化、地面磨损的半结构化环境中，做到超长距离移动与厘米级精度兼得。

比“大”更麻烦的是“软”。大型起重机是典型欠驱动系统：惯性巨大，钢丝绳带着吊具会摇摆，动作和载荷强耦合，不能像机械臂那样每个关节都精确驱动。“商场里的抓娃娃机，爪子离娃娃不到一尺；而 Autane 的‘爪子’吊在十几米外的半空，底下还挂着几十吨的集装箱。”杨俊说，集装箱最后一刻的对位，是实打实的“张飞绣花”。

让实验室代码跑进码头堆场

杨俊第一次在码头看到 RTG 人工作业是 2018 年 9 月。当时他就意识到，如果能把这套自主作业系统做出来，将产生巨大的社会价值和产业价值。

从实验室里的原理验证到第一台改造设备正式进入港口部署，杨俊团队用了整整两年。从第一台试运行设备到 60 多台设备在不同港口稳定运行，他们又在码头堆场边迭代了整整 6 年。

杨俊介绍，2020 年，第一台改造的 RTG 在码头部署。此后 6 年，系统处于试运行阶段，并不断更新迭代。其间最难跨越的一步是系统工程。“感知、控制、决策、优化、安全，这几项单点都可以了，但合在一起就不行了。”杨俊说。

论文共同通讯作者、东南大学教授李世华指出，安全是第一道关。Autane 给传统 RTG 装上由激光雷达、相机、GNSS、IMU 等数十个异构传感器组成的“感官系统”，把感知、规划、控制、运维串成一个闭环：多传感器融合与 SLAM（即时定位与地图构建）技术让起重机实时“看清”堆场、箱位和行人；基于引导向量场的轨迹规划，为 23 米高的大车规划安全路线；模型预测控制与扰动抑制技术像“小脑”一样压住集装箱摆动；运维模块自动标定传感器、自动重启故障设备，约 90%的瞬时故障无需人工即可消除。

（下转第 2 版）

分布式推进电机系统完成实飞验证

本报讯（记者张双虎、倪思洁）近日，我国自主研制的 10 吨级电动商用飞机 CE-25A 在山东滨州完成首次有人驾驶智能飞行。该机翼两侧装载中国科学院电工研究所（以下简称电工所）自研的 10 台分布式电涵道推进电机系统，系统总功率 2 兆瓦，为该型纯电动客机提供全部动力。

CE-25A 是中国商飞研制的首款电动商用飞机，主要用于城际商业飞行。不同于传统燃油客机，纯电动航空对动力系统功重比提出极高要求。面向民航局 CCAR-25 运输类飞机适航标准的严苛约束，电工所高功率密度电气驱动及电动汽车技术研究部确立了基于涵道流场强迫风冷的技术路线，创新采用电机－变流器深度融合一体化构型，突破了 4 项关键技术：基于仿生学的电机大规模自动优化设计、宽禁带半导体并联功率集成、变截面梯度阵列化散热翅片设计、高紧凑密闭腔体下多源近场电磁干扰抑制。上述成果拓宽了风冷系统性能包络，大幅提升飞行安全性，有效解决了液冷方案辅件繁杂、重量偏大带来的适航取证难度大、航程受限两大痛点。

本次配套的风冷推进电机系统由电工所设计，由湘潭电机股份有限公司制造，是当前全球最大机载分布式推进电机系统。系统飞行剖面能量效率可达 94.5%，功重比 4.34 千瓦 / 千克，对标获欧洲航空安全局适航认证的法国赛峰（2.42 千瓦 / 千克）提升 79.3%。



▲ 单台 200 千瓦推进电机系统。

▶ 集成于机翼上部的推进电机系统。　电工所供图

投入 930 万英镑，英国将开展大规模社交媒体与心理健康研究

寰球眼

本报讯 据《科学》报道，近日，英国科学研究慈善机构维康信托基金会宣布，将投入 930 万英镑支持即将开展的全球规模最大的社交媒体与心理健康研究。

今年初，英国政府就儿童使用手机和社交媒体问题启动全国咨询，公众压倒性地支持采取措施保护儿童免受暴力网络内容、陌生人接触及其他因素危害。6 月，英国政府表示，将禁止 16 岁以下人群使用一系列社交媒体应用程序，以保护青少年身心健康。该举措将于 2027 年初生效。

2025 年 12 月，澳大利亚针对 16 岁以下人群的社交媒体禁令正式生效。这是全球首个通过立法实施此类社交媒体最低年龄限制的举措。

对于英国将效仿澳大利亚实施禁令，一些心理健康研究人员持批评态度。他们强调，社交媒体对年轻人心理的总体影响尚无定论，尽管它存在一些明显危害，但也为那些因边缘化、残疾或地理位置偏僻而很少有面对面社交接触的年轻人提供了联系和支持。一些科学家担心，禁令太过“一刀切”。

“这是一次在自然实验中收集证据的千载难逢的机会。”维康信托基金会心理健康研究负责人 Camilla Iannone 说。

维康信托基金会召集了研究人员、政策制定者和部分年轻人，提出了一系列重要研究问题，最终确定了 10 个拟研究项目。每个项目都已经与年轻人队列合作，因此可以快速收集基线数据。

这些项目将评估禁令对儿童心理健康的影响。其中一个项目将在 3 年内每年调查 3000 名年轻人，以研究心理健康和幸福感以及数字生活的变化。该团队还将评估性别、性取向和家庭收入等因素对与社交媒体禁令相关的任何结果的影响。另一个项目则将同时调查父母和年轻人，以了解家庭视角下人们对禁令的态度及其影响。

各项目的调查和访谈将询问参与者生活相关的详细问题，包括他们接触的在线内容的类型，与朋友的关系，对教育、体育等活动的享受与参与程度，以及社会规范和压力等。研究人员说，这不仅有助于了解心理健康的变化，还能明确变化产生的原因。

项目负责人之一、英国伯明翰大学的数字技术研究员 Victoria Goodyear 说，此前的研究在很大程度上只能揭示心理健康与上网时长之间的相关性，无法确定因果关系，而比较青少年在禁令前后的健康和生活因素有助于确定因果关系。

10 个项目都将使用标准化量表评估心理健康，例如询问儿童“担心别人怎么看我”和“感觉什么事都没意思”等想法和感受出现的频率。项目负责人之一、英国爱丁堡大学的心理健康研究员 Alex Kwong 说，这使得跨项目比较数据成为可能。“此前，心理健康研究最大的问题之一是，评估抑郁的方法有无数种。” （徐锐）