

从实验室快步走向应用场景

脑机接口将科幻场景“接入”现实



中青报·中青网记者 王一迪

试着想象一幅画面：人类给大脑接入一个物理通道，通过意念就能与外界产生交互——几年前，这似乎还是科幻电影中的场景，如今，这项技术——脑机接口正从实验室快步走向应用场景，并逐步建立起大脑与数字世界之间的桥梁。

党的二十届四中全会通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》，对“培育壮大新兴产业和未来产业”作出明确部署。其中提到，前瞻布局未来产业，探索多元技术路线、典型应用场景、可行商业模式、市场监管规则，推动量子科技、生物制造、氢能和核聚变能、脑机接口、具身智能、第六代移动通信等成为新的经济增长点。

在10月24日中共中央新闻发布会上，国家发展改革委主任郑栅洁介绍和解读党的二十届四中全会精神时，专门提到前文所述的脑机接口等六大产业，“这些产业蓄势发力，未来10年将再造一个中国高技术产业。”

作为生命科学与信息技术交叉的前沿领域，脑机接口如何打破“脑”与“机”的壁垒，在医疗康复、产业应用中实现从0到1的突破？在政策赋能、技术迭代与资本加持下，这项曾停留在科幻作品中的技术，正面临哪些待解的难题，又将如何勾勒未来产业蓝图？记者采访了多位行业专家、产业从业者及科研人员，解码脑机接口从实验室走向现实的进阶之路。

多地争抢脑机接口产业新高地

脑机接口技术，是指在人或动物大脑与外部设备之间创建直接连接，实现脑与设备的信息交互。作为一种变革性的人机交互技术，其作用机制是绕过外周神经和肌肉，通过捕捉大脑信号并将其转换为电信号，从而实现信息的传输和控制。

从形式来看，脑机接口主要分为侵入式、半侵入式和非侵入式3种。清华大学生物医学工程学院教授高小榕解释，侵入



11月10日，上海浦东新区，第八届进博会上展示的非侵入式脑机接口技术。

视觉中国供图

式脑机接口目前主要用于医学场景，即当患者出现身体障碍或行为障碍时，通过将电极植入大脑来实现功能恢复。

在他看来，这些操作的目标是尽可能提高功能表现，例如实现文字和动作的转换。然而，运动区和语言区在大脑中并不相邻，会导致侵入式接口的创伤性较大，尤其是当需要同时实现运动和语言解码时，电极需要覆盖更大的脑区。因此，目前国际上传统的侵入式接口通常只能实现单一功能，如运动控制或语言控制，而尚未有能够同时实现两者的成熟技术。

为了加速推进脑机接口产业发展，北京、上海、天津、深圳等地正加速布局产业集群区。

以上海为例，今年1月，《上海市脑机接口未来产业培育行动方案（2025—2030年）》正式发布。“方案的重点是以医疗场景为核心、以战略产品为导向，重点推进侵入式、半侵入式产品落地，同时鼓励非侵入式产品的发展。我们希望在2030年，脑机接口未来产业能够成为战略性新兴产业的中坚力量，也希望做到百亿甚至千亿的水平。”上海市科学技术委员会前副总工及处副处长王卓曜说。

上海虹桥国际中央商务区管理委员会党组书记、常务副主任孔福安表示，虹桥作为“链接”枢纽，已布局全国首个脑机接口未来产业集群区，正构建“大科创”

生态，打造海外发展服务中心、国际人才服务中心、海外贸易中心三大平台，并携手国际专业服务机构，为脑机接口产业的国际化提供有力支撑。

此外，北京市首个脑科学与脑机接口产业集群区在昌平挂牌，首个脑科学与脑机接口产业园正式揭牌启用。深圳市成立脑科学技术产业创新中心，打造全国首个人工智能与脑科学融合的产业创新平台……一批脑机接口技术的新场景、新模式、新业态正在各地涌现。

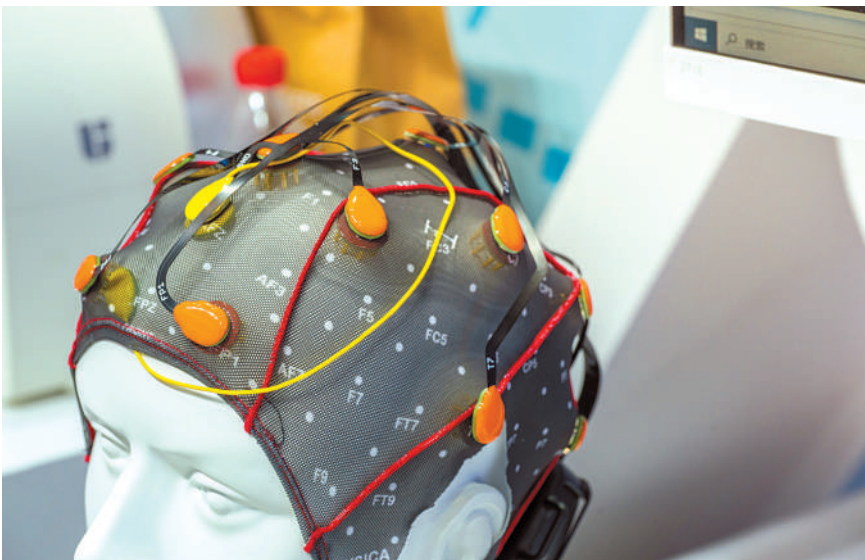
临床突破点亮生命康复新可能

一段时间以来，脑机接口技术正加速从实验室走向产业前沿，其中医疗领域成为最具活力的应用场景之一。

多模态影像技术、多模态脑功能监测技术、数字一体化手术室——在复旦大学附属华山医院虹桥桥区的数字化手术室，外科医生已经被武装到“牙齿”。

“我们可以做大脑的功能定位、电流刺激，而且这些技术已经非常成熟。”复旦大学附属华山医院神经外科副主任吴劲松说，尽管当前精准外科体系已将脑瘤患者5年生存率提升3倍至15%，致瘫率与失语率下降超90%，然而，仍有约10%的患者面临术后功能障碍的挑战。

如今，他的团队正致力于推进脑机接



11月10日，上海浦东新区，第八届进博会上展示的非侵入式脑机接口技术。

视觉中国供图

口在运动重建与语言合成方面的临床应用。

今年3月，吴劲松、路俊锋教授团队与中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心赵郑拓研究员团队、李雪研究员团队，和相关企业完成了我国首例侵入式脑机接口的前瞻性临床试验，使一名因高压电事故导致四肢截肢的男性恢复下象棋、玩电子赛车游戏等功能，达到跟普通人控制电脑触摸板相近的水平。

上海交通大学医学院附属瑞金医院脑机接口及神经调控中心主任孙伯民介绍，他的团队与企业共同研发的侵入式脑机接口装置，在治疗神经性厌食症、抑郁症上表现出明显效果。

“在难治性抑郁症的临床试验中，我们能同时记录患者脑深部的电活动，从而为我们认识和治疗该疾病提供了更多信息和数据支撑。”孙伯民说。

在临床工作中，孙伯民发现，相较于开颅手术带来的风险和创伤，患者更倾向于创口更小的非侵入式治疗方式。因此，该团队还积极研发非侵入式、可居家穿戴的脑机接口技术，为轻、中度抑郁症患者提供了新的治疗方向。

“未来脑机接口会有更多应用场景，比如帕金森、阿尔茨海默病、渐冻症、脊柱损伤、脑肿瘤、脑卒中等患者的治疗。”吴劲松说，除了严肃医疗，人们未来还可能通过生活、消费电子产品等多维

度观察大脑意识的本质，这也是未来脑科学研究非常重要的方向之一。

此前，清华大学洪波教授团队研发的无线微创脑机接口技术，也取得突破性进展。通过植入式设备解读大脑信号，该团队已成功帮助3位因脊髓损伤导致高位截瘫的患者恢复部分运动功能，为数百万残疾人带来了希望。

洪波介绍，该系统有三大特点，首先是低侵入性，安全性高，不破坏神经细胞；其次是高可靠性，无线供电通信，终身使用；最重要的是，依靠强大的算法实现了稳健的运动解码效果。

值得一提的是，该系统采用与欧美主流方案截然不同的技术路径。洪波说，为解决传统脑机接口存在的免疫损伤、电极脱落等问题，团队将电极植入患者颅骨下硬膜外，避免对神经细胞的直接破坏，同时通过无线供电与通信技术实现终身稳定使用。此外，该技术通过8个电极信号解析出100多个虚拟通道，能够精准解码患者运动意图。

目前，团队已启动大规模临床试验，计划在2025年年底前完成30至50例植入手术，并在全球同步开展小规模临床试验。

生态协同发力构筑技术新场景

能够看见色彩缤纷的世界，对眼球摘除的盲人来说是遥不可及的梦想。如今，

这个梦想却有望照进现实。日前，上海明视医疗科技有限公司完成首例兼具复杂图形加颜色的视觉重建IIT试验（研究者发起的临床研究与试验——记者注）。

“我们的目标，是能够让一个摘除眼球或毫无光感的病人恢复到0.3~0.5的视力。”10月28日，该公司创始人刘冰在上海新虹桥国际医学园区举行的“链接者”沙龙上说。

“对于眼球摘除或视神经受损的病人，以目前的医疗水平，几乎不可能使其视力逆转。”刘冰说，可能的解决途径就是脑机接口。然而，现有的脑机接口技术很难恢复丰富多彩且具有复杂图形的空间视觉图像。

为了解决这个问题，刘冰团队在优化算法后，将摄像头拍摄的景物通过植入体对大脑视觉皮层进行电刺激，绕过受损的眼部或视神经，将视觉信息转化为电信号输入大脑，从而实现“视力重建”。

刘冰表示，科研团队已入驻上海脑机接口未来产业集聚区，计划在2027年完成产品型式检验，2028年正式进入IIT试验。“我们希望在这里得到更多机会和扶持，同时成为国家脑机接口产业发展和领跑国际赛道的参与者和推动者。”

记者了解到，上海脑机接口未来产业集聚区计划于2025年年底开园，建设临床转化中心、科创转化中心、高质量孵化器、概念验证平台、展示中心等平台和载体。自今年6月启动建设以来，已吸引10家脑机接口企业入驻。

灵犀云医学科技（北京）有限公司也是入驻企业之一。针对传统脑电分析依赖人眼、效率低下的痛点，灵犀云与国内院校合作，开发出“循证动力学”模型。公司董事长闫翔翔表示，该模型通过仿照人脑动态产生机制进行建模，不仅能更精准地识别孤独症、多动症等疾病的脑功能异常标记物，还能在虚拟模型中模拟药物干预，为精神类疾病用药提供个性化方案。

“这里集聚丰富的临床医疗资源，特别是在神经精神领域，让我们能够直面患者和医生的需求。其次，上海市和闵行区对于脑机接口产业长时间、大力度的投入，让我们看到更多机会和信心。”该公司项目总监施圣陶说。

产业的加速发展离不开资本的有力赋能。上海国有资本投资有限公司党委书记、董事长袁国华表示，为了给科技企业提供全方位成长支持，上海国投构建了五大生态矩阵——基金矩阵、科创矩阵、产业矩阵、投资人矩阵、投后赋能与研究矩阵。

“聚焦三大产业和未来产业，我们今年投资规模预计超550亿元。这些将为创新型企业进行产业链的深度链接。”袁国华说，专注“投早投小、投硬科技”，一线投资人通过子基金遴选，将达到1000人以上的投资团队规模，助力上海创新集聚区产业、资本、科技高水平循环。

科研生态圈

我国科技期刊总数超5300种 高校是科技论文产出主力

中青报·中青网记者 张渺

截至2024年，我国科技期刊总数已达5325种，较2023年增加114种，其中2024年新创办期刊46种。期刊总被引频次和影响因子不断上升，2015年至2024年这十年，共发表论文1200万余篇，累计被引7100万余次，篇均被引接近6次……在近日发布的《中国科技期刊发展蓝皮书（2025）》（以下简称《蓝皮书》）中，这些数据聚焦“学术出版能力建设专题”，勾勒出中国科技期刊发展的基本情况。

《蓝皮书》由中国科协学会服务中心组织编写。报告显示，当前，我国科技论文的产出力已位居世界第一，但科技期刊的出版力（承载力）、影响力、原创力、传播力及领导力等方面，与国际先进水平仍存在一定的差距。

基于2024年期刊年检、审批等数据分析，《蓝皮书》系统阐述了我国科技期刊发展的六个核心方面：总量逐年增加、出版资源依然分散但集群化趋势明显、学术影响力持续提升、形成学科覆盖全面且多类型机构共同参与的论文发表格局、中英文期刊协同发展、科技社团成为着力打造一流

科技期刊的中坚力量。

从数据上看，主管、主办和出版单位分布依然是分散的，但国内初步形成了63个科技期刊集群，涉及3294种期刊，反映出集群打破运营单位及地域限制、抱团取暖。从引证指标上看，中国期刊总被引频次和影响因子不断上升，2015年至2024年，这十年共发表论文1200万余篇，累计被引7100万余次，篇均被引接近6次；同时，共发表高被引论文15.8万篇。

以CNKI收录的4641种期刊为统计范围，2024年，中国期刊共发表可被引论文104万篇，60个专业学科中有32个学科年发文量超过1万篇，合计约占总发文量的95%。高校仍是科技论文产出的主力，发文占比为36%，在数学、物理学等基础学科发文占比超过80%，医疗机构在临床医学相关学科中占主导地位，企业在石油天然气、冶金工程、矿山工程等工程技术领域表现活跃，科研机构则在天文学、核科学技术等特色学科中发挥关键作用。

《蓝皮书》提到，中国学者国际论文和国际期刊的学术影响力均高于全球平均水平：从即年引文影响力看，2024年，论文的引文影响力为5.11，中国学者国际论文的引文影响力为3.51，二者均高于全球论文

引文影响力2.77。

然而《蓝皮书》也提到，在国际影响力的表现上，英文刊显著领先中文刊。英文刊均国际总被引频次为2600余次，是中文刊的12倍；英文刊均影响因子4.4，是中文刊的42倍；英文刊均境外施引作者人次7000余次，是中文刊的54倍。

国际出版方面，中国SCI期刊数量稳步增长但规模不足。2024年，95.8%的中国科技论文发表在境外期刊上。这说明中国科技期刊国际出版的承载力远远无法满足我国科技论文发表的需要，还需大幅度提升。

此外，我国交叉学科期刊一定程度上彰显了交叉研究支撑关键核心技术突破的实践引领力，但与其他发达国家相比仍显薄弱。《蓝皮书》显示，中国的交叉学科期刊数量108种，归入93个学科，居世界第6位，美国有1480种交叉学科期刊，归入176个学科，排名第一。分析SCI收录的跨2个及以上学科的中国期刊发现，材料科学学科与其他学科交叉的期刊数量最多，有19种，占材料科学总刊数的70%。目前，交叉学科期刊数量较少、交叉跨度略低、多样性还不够，折射出交叉期刊布局的局限性 with 学术引领缺口，需进一步完善交叉期刊的布局体系。

报告指出，我国期刊正处于转型的关键时期，亟须通过模式创新、能力提升与生态重构，实现从“单刊发展”向“集群协同”的战略转变，推动期刊做精、做大、做强。当前，我国学术出版能力建设面临多重挑战，如期刊学科交叉布局与发达国家存在差距，对多学科融合创新的支撑作用有待加强；期刊在决策支撑方面的功能还不充分，一定程度上影响了我国在全球科技治理中的参与度和话语权；产业链各环节协同有待提升，集约化服务水平仍需加强，对数字化转型进程形成一定制约；知识服务能力与品牌影响力均有提升空间，市场活力尚未充分激发；自主科研评价体系对国内期刊发展支持不足，优质稿源外流现象仍较明显，自主评价话语权有待进一步确立。

针对挑战，《蓝皮书》提出对策建议，包括优化新兴交叉学科期刊布局，培育示范性交叉学科期刊；围绕国家战略策划选题，增强决策支撑力；推动人工智能、大数据等技术与出版全流程融合，以数智化驱动知识服务创新；培育特色社群，提升国际品牌影响力；推动相关部门建立并完善自主评价体系，推进中外期刊在评价使用中的同质等效，引导优秀成果在国内期刊首发。

科学咖啡馆

□ 孙芯芸 崔秀琴
中青报·中青网记者 魏其蒙

近年来，“轻断食”之风流行，人们通过控制进食时间让身体保持适度饥饿，以此调动脂肪、稳定血糖，清除体内的老废代谢物。这背后的原因是什么？11月13日，复旦大学雷群英团队在国际学术期刊《自然》（Nature）在线发表研究论文，提供了解释。

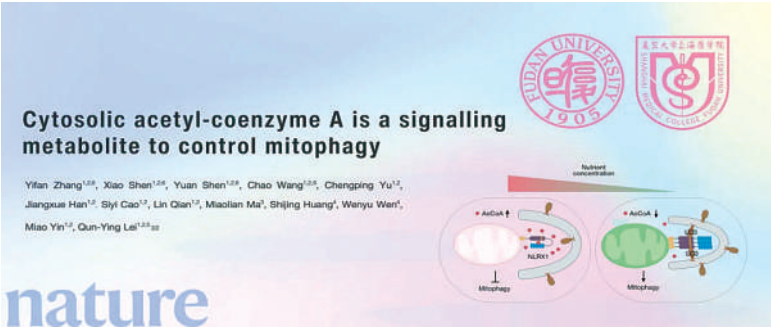
这项历经近10年探索的研究，首次揭示了乙酰辅酶A作为“代谢信使”的非经典功能，突破传统认知，发现其可直接调控线粒体自噬，为克服胰腺癌KRAS抑制剂耐药提供了全新治疗靶点，在代谢生物学与肿瘤学交叉领域取得突破性进展。

具体而言，细胞在营养匮乏时，名为“乙酰辅酶A”的“神秘信使”出动，它会绕过科学家们熟知的AMPK和mTOR这两条营养感知的“经典主干道”，独辟蹊径地将“饥饿”信号直抵细胞能量工厂——线粒体，指挥“哨兵”NLRX1作出响应。这项发现不仅解释了适度饥饿如何触发身体的积极反应，还将为未来对抗代谢性疾病、癌症乃至延缓衰老开辟了一条充满想象的全新研究道路。

复旦大学基础医学院/肿瘤研究所教授雷群英回忆，2016年年底她就与团队成员立下“flag”：要做不依赖经典代谢感知通路的创新研究。团队模拟人体“温和饥饿”环境，用接近人体过夜饥饿的营养成分配



雷群英教授（前排居中）与团队在实验室讨论。



受访者供图 雷群英团队在《自然》发表论文。

受访者供图

制培养基。实验结果显示，线粒体自噬显著启动，然而此时AMPK和mTOR这两个公认的“细胞营养感知管家”并没有反应。

“这说明细胞里藏着一条没人发现的‘新通道’，专门在生理饥饿时调控线粒体自噬。”雷群英说。

这一突破性发现为团队注入了巨大的信心。然而，为了说服审稿人，还需要找到更多坚实的证据，明确乙酰辅酶A发挥作用的落脚点。

肿瘤研究所助理研究员张一凡说：“为了获取足够的数据，我们开启了‘疯

狂”养细胞模式，实验室的细胞柜里摆满了培养皿，最多的时候同时养了200盘细胞。”真正的挑战在于从海量的基因中找出那唯一的“钥匙”。

团队动用了全基因组CRISPR/Cas9筛选技术，在两万多个基因中进行“大海捞针”式搜索，最终精准锁定了关键蛋白NLRX1。

找到NLRX1这位“哨兵”后，一个更核心的谜题急需解答：乙酰辅酶A究竟是如何向它传递信号的？雷群英团队展现出了敏锐的科学直

觉。他们首先排除了乙酰辅酶A的经典功能之一“乙酰化修饰”途径，转而大胆推测：两者之间可能存在一种更为直接的“对话”。

为了印证这一猜想，团队设计了一场“分子钓鱼”：使用带有生物素标记的乙酰辅酶A作为“诱饵”，在细胞的复杂环境中进行“拉拽实验”。结果令人振奋——NLRX1果真被成功“钓”了上来，确凿证实两者能够直接结合。

团队乘胜追击，通过更为精密的放射性配体结合实验，为这场“对话”测量出了

最常见的突变癌基因KRAS，试图用基础科学解决临床难题。

尽管KRAS抑制剂的问世为癌症治疗带来曙光，但耐药性却成为临床的“老大难”问题。团队发现，狡猾的肿瘤细胞在KRAS抑制剂面前，竟启动了一套意想不到的“自我救护”机制：药物会下调ACLY蛋白，导致细胞内乙酰辅酶A水平下降，这一变化意外地激活了以NLRX1为核心的线粒体自噬通路。通过“大扫除”般清理掉受损的线粒体，肿瘤细胞成功减轻了药物带来的氧化应激，从而逃避杀伤，产生耐药。

这一机制的破解，直接指明了全新的治疗方向。实验验证，敲除NLRX1或使用线粒体自噬抑制剂Mdivi-1，能显著增强KRAS抑制剂的抗肿瘤效果。这意味着，针对“乙酰辅酶A-NLRX1”轴的联合治疗策略，将其牢牢锁定在“休眠”状态，阻止线粒体自噬启动。

当营养匮乏或药物应激时，乙酰辅酶A浓度下降，“刹车”随之松开，重获自由的NLRX1立刻改变自身形象并集结成队，主动招募自噬蛋白LC3，启动对问题线粒体的选择性清除。为了获取实证，团队构建了无法结合乙酰辅酶A的NLRX1突变体。结果发现，这个“失灵的刹车”导致线粒体自噬在营养充足时也变得异常活跃，就像一辆油门卡死的汽车。这一实验为乙酰辅酶A与NLRX1的相互作用提供了无可辩驳的证明。接着，雷群英团队将目光投向肿瘤中