

无创接入，脑机接口迎来更多可能

“科技突破的程度，很大程度上决定未来产业发展的速度、广度、深度。”

眼下，新一轮科技革命和产业变革加速演进，前沿技术不断涌现，引领和支撑未来产业快速崛起。

“十五五”规划纲要提出，瞄准引领未来发展重点领域，构建未来产业全链条培育体系，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。

前瞻布局未来产业是发展新质生产力的必然要求，也与我们的日常生活息息相关。今天，中国科学院院士、南京大学常务副校长郑海荣带我们走进脑机接口产业发展前沿，了解小接口里的大学问、新成果。

不同技术路线，存在多重挑战

脑机接口是连接人脑与外部设备的新型人机交互技术，也是当前全球科技竞争的前沿领域。这一技术可以构建大脑与机器的直接信息通路，实现神经信号的读取、解码与写

入，推动碳基生物智慧与硅基人工智能深度融合。

目前，全球脑机接口正处于实验室研发向规模化应用过渡的关键阶段，侵入式技术虽取得阶段性成果，但生物相容性、长期安全性等瓶颈仍难以突破。多年来，我与团队深耕无创超声脑机接口方面的多项技术难题，探索出一条非侵入式脑机接口技术发展之路。

目前，脑机接口主要有侵入式、半侵入式和非侵入式3条技术路线，技术形态各不相同，面临的挑战也各有侧重。

侵入式技术，是通过外科手术将微型电极植入大脑皮层。这一技术的

神经元信号采集精度最高，但也有明显短板：植入电极易引发人体免疫排斥反应，长期使用也会出现信号衰减、器件失效等问题。此外，手术存在一定风险，且仅能采集局部脑区信号，无法实现全脑范围探测。

半侵入式技术，是将电极置于大脑皮层表面，寻求信号质量与使用安全间的平衡，但依然无法规避颅内植入带来的潜在风险。

非侵入式技术，则是依托穿戴设备从头皮采集脑信号，有着无创安全、易普及的特点，但其研发技术壁垒极高。颅骨与头皮会大幅衰减、干扰神经电信号，导致原始数据混杂大量噪声，如何在复杂环境下实现神经信号稳定采集与高精度解码，是摆在全球科研人员面前的共同难题。

放眼全产业链，我国脑机接口产业发展也面临着多重挑战：全脑信息定向写入技术有待突破，适配行业需求的低功耗专用神经芯片供给不足，通用芯片难以兼顾低功耗、高算力与多通道实时处理的要求。脑机接口直接接触及人类思维与隐私边界，配套的伦理规范、行业标准与监管体系也亟须同步构建完善。

推动碳基智慧与硅基算力深度交融

结合技术演进规律与应用落地节奏，我们有分阶段发展预期：短期1—2年，优先释放医疗领域价值。推进脑机接口技术医学测试与临床落地，加快脑机接口医学大模型、运动及语言功能重建技术规模化应用；中期2—5年，全面拓展技术边界。集中攻克无创光声电磁脑神经功能成像、人工视觉、听觉、触觉等感知功能修复技术，同时，推动无创脑机接口在自动驾驶、具身智能、智能制造、全民健康管理等场景的研发与应用；中长期5年以上，探索脑机融合、脑际通信等新形态。重点突破脑神经信息成像读取、智能模型翻译重建、神经信息定向写入等前沿技术，推动脑机接口朝着大规模普及、全场景覆盖、消费级落地、轻量化可穿戴的方向迈进。

我们可以想象，在航空航天、高危作业等领域，用意念辅助操控；在工业领域，开展脑控机械臂、无人机、人形机器人应用，实现人脑与具身智能的高效协同；在消费电子领域，融合穿戴设备的轻量化脑机产品，有望颠覆传统人机交互模式，催生新兴消费业态。

从科技变革维度来看，脑机接口是联通碳基生物智慧与硅基人工智能的枢纽。人工智能发展将依次经历数据智能、物理智能、生物智能等阶段。硅基智能擅长逻辑运算与数据处理，却难以复刻人类大脑的创造力、感知力与自主意识。脑机接口可以搭建起人脑与机器之间的双向高速信息通道，推动碳基智慧与硅基算力深度交融，是人工智能突破现有发展瓶颈、迈向高阶形态的抓手。

相信在多方协同发力下，我国脑机接口技术将持续突破、加快落地。从实验室的技术探索，到病房里的生命守护，再到全场景的人机协同，无创脑机接口技术将以安全、精准、普惠实现赋能，助力开启人机共生、智慧相融的新未来。

（郑海荣 作者为中国科学院院士、南京大学常务副校长，人民日报记者姚雪青采访整理）



▲第二十四届中国·海峡创新项目成果交易会上，一名参观者在福建省脑机接口与神经调控转化工程研究中心展台体验。

张斌 摄（图源：影像中国）



▲“北脑一号”半侵入式脑机接口系统。
施觉 摄（图源：影像中国）

探索无创入脑，拓展医疗场景应用

面对挑战，我们团队选择了一条新路径——无创超声神经调控原创技术路线。不同于传统电极植入思路，该技术依托超声、光、电磁等多元物理场，在不破坏人体天然生理屏障的前提下，实现全脑神经信息双向读写。

让超声波能够“穿透”颅骨、精准作

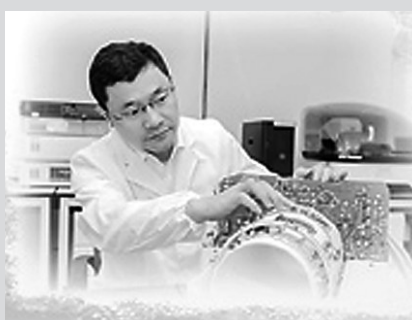
用于颅内深部脑区，是这项技术要跨过的第一道关。在“穿过”颅骨的过程中，超声波易出现折射、能量损耗等问题。为此，团队开展复杂介质声场理论建模、仿真计算与对照实验，逐一破解超声波穿颅传播、能量聚焦、安全调控等科学问题，从科学原理层面确证了无创超声神经调控技术的可行性。

无创超声脑机接口技术有一个关键硬件——高密度相控阵换能器。此前，这一器件长期被国外技术垄断，通过深耕底层压电材料研发与精密加工工艺，我们团队完成全链条自主攻关，顺利实现器件国产化替代。自研的换能器，在电声转换效率、穿颅能力、聚焦精度等主要指标上表现出色。正是依托于此，团队成功研发万通道级智能神经调控系统，融合声场校正算法与多模态影像导航技术，打造出如同“大脑

GPS”一样的高精度定位追踪体系，可将超声能量精准汇聚到颅内10厘米深度的毫米级靶点，既解决了传统电磁刺激作用范围弥散、作用深度不足的问题，又消除了植入式技术的创伤隐患。

在此基础上，我们提出“神经打印机”的前沿技术概念，利用多物理场调控大脑内纳米级离子通道，实现外部信息向大脑的定向“写入”。目前，该技术已在动物实验中实现特定记忆和行为的可控调节，有助于难治性脑疾病干预、人体神经功能重塑。

通过系统性临床研究，我们发现，无创超声调控能够有效降低难治性癫痫的发作频率、强度，明显改善重度抑郁患者的情绪状态与睡眠质量。值得关注的是，在10余例长期意识障碍患者的临床干预中，半数以上患者成功苏醒，部分患者甚至逐步恢复语言表达、自主进食等生活能力，展现出该技术在重大脑疾病诊疗与康复领域的应用价值。



▲郑海荣在进行实验操作。
南京大学供图