“硬币”和“头发丝” 意念赛车照进现实

我国侵入式脑机接口技术进入临床试验阶段

今年3月25日，复旦大学附属华山医院手术室里，一根比发丝还要细的电极穿过5毫米颅骨孔洞，嵌入因高压电击失去四肢的男性受试者运动皮层。仅3周后，他戴着黑色特制帽子，仅凭“意念”，就让屏幕上的赛车漂移过弯。

“现在我可以通过自己的意念控制电脑，有种心随所动的感觉。”受试者感慨。此刻，硬币大小的植入体正嵌在他的颅骨上，捕捉毫秒级的单神经元电信号。

截至今年6月，该系统持续运行稳定，未出现感染和电极失效情况，为大规模临床试验提供关键支撑。这是我国首例侵入式脑机接口的前瞻性临床试验，由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及李雪研究员团队，联合复旦大学附属华山医院神经外科吴劲松/路俊锋团队，与相关企业合作开展。

这标志着我国在侵入式脑机接口技术上，成为继美国之后，全球第二个进入临床试验阶段的国家。

受试者手术中。

发丝1%细的电极植入大脑

一根只有头发丝1%那么细的超柔性电极，正尝试以一种前所未有的方式，融入人类大脑神经组织的微观宇宙。

在这之前，代表侵入式脑机接口业界最高水平的，是埃隆·马斯克创办的Neuralink公司。而赵郑拓团队研制的神经电极，截面积仅为Neuralink所使用电极的五分之一到七分之一，柔性超过百倍。这种超柔性电极，让脑细胞几乎“意识”不到异物存在。植入体直径26毫米、厚度不到6毫米，仅硬币大小。

与Neuralink贯穿颅骨的设计不同，中国方案只需在运动皮层上方的颅骨处“打薄”出硬币大的凹槽，再在凹槽上开一个5毫米穿刺孔，“不需要整体贯穿颅骨”。而项目团队采用的神经外科微创术式，能够有效降低手术风险，术后康复周期显著缩短。

电极植入后，须在十几毫秒内完成神经信号处理。赵郑拓团队通过自主研发的在线学习框架解决了这一挑战。这相当于给解码器提供了实时在线的辅助，其原理类似于“汽车的辅助驾驶系统”。

硬币大小的植入体，同样暗藏技术博弈，芯片组需要处理前端传感器传递的微弱神经信号。“信号首先被放大器放大，然后变成数字信号。”赵郑拓说，“由于采样率非常高，需要提取出最有效的特征，才能传输出去。”系统在内部完成原始信息特征提取和压缩后，无线传输给外部计算机进行最终解码。

“往大型体育馆里放麦克风”

电极的稳定性曾是最严峻挑战，李雪研究组早期遭遇了许多困境。

“最初的电极在植入大动物体内后，轻轻一碰就断了。”李雪感慨。这一境况促使团队寻找合适的材料。

“根据我们从书本上学到的，或者逻辑上推断，判断哪些材料加入会更好用、更结实，然后一个一个试验。”李雪告诉记者，制作难点在于电极既要结实，又要安全，“不漏电”“不会被轻易揪断”。

植入过程采用特殊工艺。“使用一根非常细的钨针，电极前端会有一个孔，钨针可以穿过这个孔。”李雪说，“植入完成后，把钨针取出来，电极会留在里面。”

团队还基于电极超柔性特点做了电极冗余设计，“确保电极不会脱落”，以解决柔性电极位移和信号衰减问题。

供电方案设计采用“无线充电和无线信号传输方案”，患者佩戴的帽子状设备采用连线传电的方式，“目前没有内置电池”。但李雪提到，已规划升级路径，“后期可能会加入小电池以实现长期供电”，这将进一步解放患者行动限制。

针对术后感染风险，团队采用“常规的灭菌方案”。李雪提到，患者日常生活不受影响，“可以正常活动，不需要一直戴着帽子”。

用复旦大学附属华山医院神经外科副主任医师路俊锋的话说，这例脑机接口手术，就像是往大型体育馆里放麦克风。

大脑有近千亿个神经元，就像一座密闭的体育馆。大脑皮质共有6层，近千亿个神经元就像是分布在6层看台上的观众，每个区域的观众通过发出不同的声音执行不同的功能。

不同的脑机接口技术，就像不同的收音方式。非侵入式技术类似于在体育馆外面听里面的声音；半侵入式技术，如皮层电极，相当于在看台顶部放置大量话筒，能捕捉到更多群体清晰的声音。而侵入式脑机接口技术，就如同进入体育馆内，将许多话筒贯穿6层看台，放置到观众的面前，“近距离听附近每个观众的声音”。

复旦大学附属华山医院与中国科学院脑智卓越中心形成了“楼上手术楼下研发”的协同模式。手术当天，团队借助高精度导航系统，在受试者清醒状态下，将两根超柔性电极植入其大脑运动皮层指定区域。

2024年12月，依托两家单位联合共建，上海市脑机接口临床试验与转化重点实验室获批成立。这次手术的成功，是实验室成立后的首项重要成果。

“重点实验室将继续致力于推动脑机接口技术从基础研究走向临床应用与产业转化，为脑机接口科技成果转化打通‘最后一公里’。”实验室主任、复旦大学附属华山医院神经外科专家吴劲松说。

↗植入体直径26毫米、厚度不到6毫米，是全球最小尺寸的脑控植入体，仅硬币大小。

电极前端仅5毫米植入脑组织，后端锚定在颅骨镶嵌的植入体上。整个手术精确到毫米级别，颅骨仅开5毫米穿刺孔。

手术前半年，团队已完成20余次模拟植入演练。“我们采用功能性核磁成像定位、人脑图谱绘制定位、受试者专属三维模型构建等5种脑功能定位方案。”路俊锋向记者解释，“手术中，受试者在清醒状态下想象手部运动，医疗团队才能实时验证神经信号输出，找到准确位置。”

当电极成功记录到电信号时，团队成员“脸上的笑容是发自内心的”。

后来，植入体在颅骨里面放好，头皮缝好。受试者在第五天实现了简单的脑控。此时，整个团队“才真正放心”。

“意念”赛车照进现实

术后一周，受试者出院。经过两到三周训练，已实现“意念”控制电子产品。在系统外部设备集成的特制帽子中，无线供电器和信号接收器与植入体高效耦合。

据赵郑拓解释，训练过程“有点像学骑自行车”，一开始还需要刻意思考每个动作，但随着练习，逐渐变得自然流畅。“利用已建立的神经关联，进行运动想象。”赵郑拓解释，“更像是成年人学习原本不会的新技能。”

据他介绍，当前的中国方案具备原创突破，电极尺寸更小，柔韧性更强，更关键的是临床普适性。此外，成本控制也已纳入规划，随着流程优化，术前三维重构等环节将精简。

“现在的神经外科里常用的手术器械和设备，足以支撑整个系统的植入手术。”路俊锋说。这意味着将来，无须依赖手术机器人，“普通三甲医院均可实施”。

隐私保护机制已嵌入系统设计，受试者原始脑活动信息不会有泄露风险。“主要就两部分信息，即大脑里提取的神经活动信息和解码器解读出来的控制指令，只有第二部分信息会对外输出。”赵郑拓说。当前系统仅为单向信息提取，“不存在受到网络安全攻击的风险”。

但挑战依然存在，赵郑拓提到，目前“术后受试者神经活动受到很多因素影响”；产业协同也需加强，“和终端设备的研发团队需要紧密配合，有很多接口需要打通”。

系统安全性和功能性，在人体试验前，已经通过非人灵长类动物得到了验证。植入猕猴运动皮层的系统持续稳定运行，“未出现感染和电极失效的情况”，猕猴成功实现脑控光标运动。更关键的验证发生在平稳运行后，猕猴的植入体被手术安全取出，并更换新植入体，在同一个颅骨开孔位置完成二次植入。

术后，系统稳定运行，证明植入体的后续升级计划可行。电极如今设计的5年寿命并非终点。

“这个系统可以支撑患者在相对较长周期内不用作更换。”赵郑拓对记者强调可持续性，“未来，患者可以通过小的手术更新换代，永远使用到最新技术。”

目前，项目团队正将技术延伸至物理交互层面。应用场景将瞄准完全性脊髓损伤、双上肢截肢及肌萎缩侧索硬化症患者等群体。相关技术也适用于脑卒中导致语言障碍的人群，未来可能重建语言桥梁。

当受试者用“意念”操控赛车通过终点的瞬间，硬币大小的中国方案正将科幻照进现实。这支跨越神经科学、微电子、临床医学的团队，在超柔性电极上书写的故事，正在重塑人机交互边界。 （中国青年报）