

# 脑机接口始终是“辅助工具”而非“替代方案”

● 刘伟

单根电极植入速度从 17 秒缩短至 1.5 秒、制造成本骤降 95%、超 1 万名用户完成植入意向注册,脊髓损伤者用意念操控机械臂进食……

最近,当美国 Neuralink 公司展示其新一代脑机接口技术时,这一前沿领域再度成为全球焦点。一系列突破性进展,也让这项曾停留在科幻场景中的技术加速落地。

然而,热闹背后,脑机接口仍面临生物相容性、信号解码精度、伦理监管等多重难题。它究竟是重症患者的救赎之光,还是普通人无法触及的技术噱头?

## 技术解码: “意念控物”的底层逻辑

脑机接口的核心是在大脑与外部设备间搭建“神经翻译官”,实现脑信号与机械指令的双向闭环交互。其完整流程分为信号采集、算法解码、指令执行 3 步。

根据信号采集方式,目前该领域形成了各有侧重的三大路线。一是侵入式,需开颅将电极直接植入大脑皮层,信号精度最高,但手术风险与免疫反应突出。二是非侵入式,通过头戴设备无创采集头皮外信号,安全、便捷但精度有限,适合健康人群消费级场景。三是介入式,通过血管将电极送入大脑附近,无需开颅且信号质量接近侵入式,是近年崛起的“中间方案”。

Neuralink 的突破源于三大核心系统协同——手术机器人搭载发丝般细的针头,配合 6 套显微镜与光学相干断层扫描技术,实时追踪大脑运动,避开血管将柔性电极线分 128 次精准植入;植入设备采用微机电系统工艺,内置 1000 个信号通道捕捉大脑表层 4 毫米内神经活动;神经解码技术通过人工智能算法将脑信号转化为机械臂运动、电脑操作等指令。

2021 年,Neuralink 曾展示让猴子用意念玩乒乓球的实验;2024 年,成功完成首例人类大脑芯片植入手术;2025 年,新一代 Rev10 机器人将手术效率提升十几倍。其长期目标是将手术时间压缩至 1 小时内,让患者在清醒状态下完成,如同激光眼科手术般便捷。从技术迭代看,Neuralink 已实现

从实验室到临床的跨越。

## 全球竞速: 三大路线的差异化突围

Neuralink 的进展并非孤例。全球 8 家核心企业分三条路线竞相突围,中美企业成为主要玩家。

其中,侵入式路线是重症患者的“救命稻草”。除 Neuralink 外,美国 BrainGate 公司采用半侵入式方案将电极置于硬膜外,风险相对更低。其 64 通道电极阵列的光控控制精度达 92%,已帮助渐冻症患者实现吃饭、喝水、文字输入等基本需求,临床数据扎实。Neuralink 首款产品“心灵感应”(Telepathy)同样瞄准脊髓损伤、渐冻症等群体,目前十几名受试者已能每天使用设备 8 小时,验证了技术基本可靠性。

介入式路线则是微创时代的“中间方案”。美国 Synchron 公司的“Stentrode”通过颈静脉将电极支架送入大脑附近,无需开颅,且获美国食品药品监督管理局“突破性设备”认定。中国南开大学联合企业完成全球首例介入式脑机接口人体试验,患者术后可自由抓握物体、取药,且电极可逆取出,避免二次手术风险。这种微创方案兼顾了信号质量与安全性,成为医疗与高端消费场景潜力股,上海已将其列为重点发展路线,目标是在 2030 年前推动多款产品落地。

非侵入式路线则是人人可用的“轻量级方案”。非侵入式无需手术,最有可能走进普通人生活。例如,中国清华脑机团队开发的 EEG-fNIRS 融合设备,对抑郁症的识别准确率达 92.7%。

以上三条路线并非零和博弈,而是差异化发展——侵入式聚焦重症医疗,介入式主攻中高端医疗与消费市场,非侵入式瞄准大众健康与日常交互,共同推动产业从实验室走向规模化应用。

Neuralink 虽然实现 1.5 秒快速植入,但核心难题仍未破解。一是通道数量不足。1000 个通道仅覆盖大脑极小区域,实现完整语言交流、全身运动控制需万通道级设备突破,对电极制造与信号传输提出更高要求。二是深度植入难题。当前电极仅插入大脑表层 4 毫米,要接触更丰富的神经元,尤其是视觉相关脑

区,需突破 50 毫米深度技术,这会增加手术风险与组织损伤。三是长期稳定性。大脑对植入物产生免疫反应,电极可能被疤痕组织包裹导致信号衰减,侵入式设备 1 年内信号衰减率最高可达 40%。如何平衡植入深度、通道密度与信号稳定性是核心痛点。

## 脑机接口的“可为”与“不可为”

尽管 Neuralink 的进展令人振奋,但在光环背后,脑机接口要想真正普及,仍需跨越技术、生物、伦理、成本 4 道鸿沟。

脑机接口直接触及人类核心隐私——思维与情绪。电极采集的脑信号不仅包含运动指令,还涵盖思维模式、情绪状态、记忆片段等敏感信息,一旦泄露或被滥用,可能导致心理操控、非法监控等后果。更棘手的是,技术从“修复型”向“增强型”演进是否会加剧社会不平等,设备故障导致人身伤害的责任如何界定,这些问题尚无明确答案。中国信息通信研究院建议,需建立多学科伦理审查委员会,制定分类分级审查指南,并推动形成国际标准。

此外,Neuralink 虽将针头夹具成本降低 95%,但整体手术与设备费用仍居高不下,侵入式脑机接口单次植入成本高达数十万美元,远超普通患者的承受范围。即便是技术更成熟的

BrainGate,也仅服务少数重症患者,难以规模化推广。要惠及更多患者,技术需进一步迭代以降低成本,同时依托医保政策、公益基金等社会资源,形成可持续商业化模式。

从发展态势看,未来 3 至 5 年,侵入式技术将持续服务重症患者,帮助瘫痪者恢复基本生活能力,为渐冻症患者提供沟通工具;介入式技术加速规模化,成为医疗与高端消费“主力军”;非侵入式设备走进家庭,用于情绪监测、注意力训练、疲劳驾驶预警等场景。

但需清醒认识到,脑机接口的终极目标——全脑接口、意识上传等,仍面临巨大技术鸿沟。人类大脑有近千亿个神经元,目前最先进设备仅能捕捉数千个神经元活动,要全面解读与控制大脑功能,需神经科学、材料科学、人工智能等多学科取得突破性进展。

更重要的是,脑机接口始终是“辅助工具”而非“替代方案”。它能帮助瘫痪者重获行动能力,却无法复制人类情感、创造力与道德判断;能提升人机交互效率,却不能颠覆人与技术的主从关系。正如 Neuralink 的定位——先服务最需要的人,而非追求“赛博格”(机械化有机体)噱头,这才是技术发展的理性方向。

(作者系北京邮电大学人机交互与认知工程实验室主任)

## 延伸阅读

### 美脑机接口公司获批开展首个长期临床试验

美国脑机接口公司 Paradromics 近日宣布,其脑机接口(BCI)已获美国食品和药物管理局(FDA)批准,开展首个长期临床试验。

据《自然》报道,作为美国企业家埃隆·马斯克旗下脑机接口公司 Neuralink 的最大竞争对手之一,Paradromics 将为两名因神经系统疾病或意外伤害而丧失语言能力的志愿者植入 BCI。试验有两大目标:一是确保设备安全,二是恢复患者的实时语音交流能力。

Paradromics 的 BCI 拥有直径约 7.5 毫米的有效区域,内置纤细且坚硬的铂铱合金电极。当这些电极穿透大脑皮层

表面时,可记录约 1.5 毫米深处单个神经元的活动。电极通过导线与植入患者胸部的电源和无线收发器连接。

Paradromics 首席执行官 Matt Angle 表示,这是首个以合成语音生成为目标的 BCI 临床试验。“可以说,目前 BCI 能为患者生活质量带来的最大改变,就是恢复其语音交流能力。”

该试验还将探索能否精准检测志愿者想象手部运动时的神经活动,从而让他们可以通过意念控制电脑光标。根据初步结果,该试验可能扩展至 10 名志愿者,他们将接受两个大脑皮层植入物,以增加信号丰富度并覆盖更多脑区。(王方)