

脑机接口：连接未来的“超级工程”

脑机接口已从曾经的科学幻想和前沿探索，逐步演变为一项具有深远潜力的技术革新。从早期的基础研究，到如今在医疗、科研等领域的初步应用，脑机接口正以其独特的魅力，吸引着全球科研人员和产业界的目光，并不断改变着我们对人类大脑与机器交互的认知。中国神经科学学会脑机接口与交互分会创始主委、中国科协脑机接口产业技术路线图负责人陶虎教授等专家分享了他们关于如何让大脑连接未来的独到见解。

脑机接口无疑是一项极具挑战性的“超级工程”。它复杂程度高，人类对该领域的未知程度也很深。未来，我们需要依靠各学科不同方向的共同努力，一起推进这个“超级工程”。



>> 脑机接口的“读与写”

国内外的研究正慢慢收敛成两个科研范式。一是向极端方向发展，比如深空、深海探索等。二是学科交叉，其中蕴含着诸多新机会。脑机接口便是学科交叉的典型例子。

为何大家对脑机接口如此感兴趣？陶虎认为，最根本的原因是我们对大脑充满好奇。大脑，作为人类最优越、最重要的器官，在人类进化历程中选择了向更高级、更复杂、更先进的方式进化。成人大脑里有近1000亿个神经元，它们相互连接，组成了一个庞大而复杂的计算网络。

脑机接口，就是让大脑神经信号和外部设备之间，直接进行信息交互的一种技术，省略了无数的神经元传导。可以简单理解为：这是一种让大脑与外部设备直接“对话”的技术。脑机接口领域相关研究人员解释称，脑机接口一方面是读，一方面是写。

“读的目的是完成解码和控制。通过特制的电极，脑机接口可以读到大脑中的神经信号，如果用图呈现，就是许多不停震荡的线，就是我们日常看到的脑电图。”该研究人员介绍道，接下来就需要研究大脑究竟想让你干什么。

正常的人脑中，脸、手、腿等身体各处的肌肉和骨骼等能认识这种信号，做出相应反应。而脑机接口，捕捉到这种信号后会进行分析处理，翻译成机器能明白的指令，从而实现脑机连接，这就是解码。接下来就是机器帮助实现控制。翻译好的信号被送到各种设备，比如机械手臂、轮椅等，这些设备会随人的意念而动。

“写相对于读还难一些。”而所谓写，就是把外部信息“写”入大脑，对其进行刺激。“像对中风、癫痫等神经性疾病的治疗，都是通过写入来完成的。”

>> 三大技术路径是关键

大脑和机器的连接方式是脑机接口的关键。

目前，脑机接口主要有三大技术路径：非侵入式、侵入式和半侵入式。三大路径，各有利弊，最大区别在于信噪比（接收到的有用信号强度与接收到的干扰信号强度的比值）和安全性之间的取舍。

非侵入式，就是无创的，在头皮上就可以做，优点很明显：无感染，几乎没风险。但它只能监测到神经信号的整体活动，信号差、不精准。非侵入式隔着头皮、头发、角质层等，都会对信号有很大干扰。另外，隔着头发采集脑电一般情况下还要涂导电膏，来增强信号，但导电膏几小时就

干了，信号又会变差。

侵入式需将电极植人大脑，直达神经元细胞群体之中，数据量巨大，读取的脑电波精准，信号好。由于传递出来的信号量巨大，之前只能靠有线完成。这根线从颅内连接到外面的设备，长期在非无菌环境下，大脑容易发生感染。长期来看，电极还会因排斥反应而慢慢失效——人体的自我保护机制会想办法，把这个外来物给挤出去，渐渐地，类似疤痕组织的东西会把电极包裹起来，信号会越来越差直至失效。

既安全信号又好的方法存在吗？这就是半侵入式要解决的痛点。如果把大脑结

构和鸡蛋结构进行类比：头骨就是鸡蛋壳，鸡蛋壳和鸡蛋清之间的那层薄膜就是脑硬膜，而大脑在脑硬膜下面。半侵入式，就是把电极放在了脑硬膜外，不会引起排斥反应，可以避开头骨的屏蔽，直接获取到比非侵入式更清晰的神经信号。

另一方面，相较于侵入式，由于技术原因，半侵入式所需信号量少，因此可以通过无线将信号传递出来，大大降低了感染风险。据悉，清华大学团队自主研发的设备选择的就是这条技术路径。

三种技术路线，各有利弊，互为补充。目前，我国三种发展路径都在积极推进。

>> 在技术等方面面临着较大挑战

脑机接口目前在技术、法律、伦理等方面还面临着较大挑战。

脑机接口的难度，首先体现在它的多学科交叉性。它涉及微电子、神经科学、材料科学、机器人技术，甚至临床医学和心理学。

陶虎举例说，从大脑提取信号的电极、处理信号的芯片、分析信号的算法，到无线传输的天线，整个系统需要封装在一个极小的设备里，植入大脑。这不仅要考虑生物安全性、功耗，还要解决发热问题。

这一切都由应用场景决定。比如，帮助手部不能动的残疾人，我们需要在其运动区植入电极，采集信号，通过算法解析运动意图，再传输到外界的机械手或机械臂执行。但这只是开始，要形成完整的运动功能重建，还需要在机械手上安装传感器，将感觉信号编码后传回大脑，形成一个闭环。

芯片、电极、算法、植入机器人，每一样都要匹配。而且我们还需要花费大量时间验证其安全性，特别是长期安全性。“五年前在实验室里就做好的东西，直到前两年才拿到临床伦理批件，开始在人的大脑上进行试验。”

脑机接口领域，尤其是植入式设备，对安全性、长期在体的要

求极高。我们选了一个最难的领域，但好在坚持下来了。现在，我们可以合法合规地采集人类大脑数据，进行算法迭代。如何安全高效地获得高质量信号？如何理解神经编码？如何利用AI和大模型等先进技术更好地解析大脑信号？这是当前面临的三个核心问题。

在脑机接口领域，除了技术挑战，我们还面临着诸多法律法规与伦理道德的问题。比如公众对脑机接口还有很多疑惑。这需要我们进一步加强科普。在推进科研和产业化的同时，我们必须时刻牢记伦理原则，确保脑机接口技术的发展符合人类的利益和价值观。

“总体而言，中国脑机接口领域缺的是系统工程师。我们有很多基础科研人员和企业类工程师，但缺乏能把复杂产品通过系统工程方式做起来的战略工程学家。马斯克就是一个很好的例子，他虽然不是博士，但他是一个很好的系统工程师，能把特斯拉、SpaceX、脑机接口等复杂产品做起来。”陶虎呼吁有条件的学校专门开设脑机接口的系统工程专业，培养更多的系统工程师。脑机接口市场潜力巨大，值得我们去投入。

>> 脑机接口的发展与展望

最近十年，脑机接口发展突飞猛进，呈以下发展趋势。

一是从运动控制到语言解码。运动控制相对简单，比如用大脑控制机械手、轮椅等。但语言就复杂多了，因为语言涉及的神经解码机制更复杂，涉及的脑区也更多，而且不同人的语言还有差异。不过，这也是现在临床发展的趋势，语言功能障碍的病人特别需要语言解码功能。

二是从低通量到高通量。人类大脑有近1000亿个神经元。目前临幊上最多只能同时采集1000个通道的信号，差距巨大。所以，怎么提高信号采集的通量和效率，是未来的一个重要方向。

三是从单脑区到多脑区。大脑处理任何事，都是多个脑区协同工作的。所以，覆盖多个脑区进行信号采集和调控，解析的精度和效率会更高。但调控的

话，不一定非要覆盖整个脑区，就像城市交通，采集信号需要每个点都有摄像头，但调控交通只需要在主要干道上设置交通灯就行。

此外，相关学科的发展对脑机接口发展起了很大作用，比如微纳传感器、微电子、医疗器械、芯片技术、材料科学、算法和神经科学等。特别是人工智能和大模型的介入，对处理脑机接口的海量数据有很大帮助。

谈及脑机接口的未来愿景，陶虎认为，医疗领域无疑是当前的主要发力点，但工业与机器人的互动同样不容忽视。我们目前专注于AI与脑机接口的融合，致力于打造一整套脑机操作系统。尽管人类大脑是宇宙中最复杂的事物，我们所从事的工作也充满挑战，但我们坚信，通过不懈努力，脑机接口技术必将开创一个全新的未来。