



脑机接口的物理学

(中国科学院深圳先进技术研究院 李骁健 编译自 Sidney Perkowitz. *Physics World*, 2023, (12): 29)

人类的大脑是一台惊人而复杂的机器。人类大脑皮层中有超过800亿个神经元，每个神经元有1000个突触，我们的大脑每秒处理大约1亿比特的信息。想象一下，在大脑进行思考时，去实时地测量、提取和解释大脑中的所有信号。从《X战警》到《黑客帝国》，对大脑的研究曾经仅限于科幻小说领域，但是今天，人类已经可以将大脑连接到电脑来控制机械手臂，或将你的想法翻译成文字。

脑机接口(brain-computer interface, BCI)是大脑和外部设备(通常

是计算机)之间的桥梁。脑机接口收集、分析并将来自大脑的电信号转换为计算机可以理解和执行的命令。它也可以用外部信号调节大脑活动。脑机接口是神经科学、生物医学、物理学和技术的结合，它可以改善严重疾病患者的生活。在机器人、神经科学、科技、游戏和计算机等领域脑机接口也有着应用。

在过去的25年里，瘫痪的人通过脑机接口实现了仅凭思想来操作计算机。他们恢复了因中风而丧失的语言能力；肢体丧失功能或瘫痪的人借助脑机接口重新发挥了肢体

功能，或是操作机械臂和机械手。脑机接口技术能够诊断和治疗癫痫等神经系统疾病，甚至有望让盲人重见光明。然而大多数脑机接口治疗需要做脑外科手术，把电极放置在大脑的表层(皮层)或更深的地方，这种操作可能会引起出血或感染的风险。而且研究人员目前还不清楚植入的电极对脑组织造成的影响和潜在的损害。就目前来看，电子植入物还无法安全可靠地帮助数百万潜在受益者。事实上，全世界大约只有50名有严重行动受限疾病(例如瘫痪)患者参与了植入实验。

因为只有所有其他治疗都失败或是做试验的前提下，患者的植入手术才会被允许。对这些人来说，改善低质量生活的收益远大于潜在的危害。

运用物理原理和方法可能会使脑机接口设备的使用更安全、更耐用、更广泛，比如改进脑机接口的植入方法和材料。我们通过光、磁场或超声波与大脑相互作用来避免或尽量减少脑部手术的思路可能更为重要。无创、无线和便携或可穿戴的脑机接口设备可以作为大脑的研究工具和医疗器械，并且可以日常使用。

简要的历史

从古代到19世纪，医生和实验人员为医学治疗尝试了各种实验，试图改变大脑的电生理活动。1924年，德国精神病学家汉斯·伯格利用放置在病人头骨上的电极记录到脑电活动，发明了脑电图(EEG)技术。20世纪70年代，物理和计算机学家 Jacques Vidal 演示了通过思想控制外部设备的方案，即佩戴了脑电图交互设备的受试者只通过思想来移动电脑屏幕上显示的光标。

脑电图是一种有价值的用于诊断癫痫等疾病的非侵入式工具。它能帮我们确定癫痫患者的病因和类型，也能用在痴呆、脑肿瘤和脑震荡等疾病的研究上。由于脑电图是对大群神经元进行采样，信噪比很低，很难将这些信号与特定的脑活动联系起来。而植入式电极可以采集选定的神经元信号。现在许多研究人员和临床医生使用一种叫“Utah阵列”的植入式电极阵列。这是一种由100个p型硅电极(10×10结构)组成的硅电极阵列，电极间隔

400 μm，放置在4×4 mm的绝缘基板上。电极长度为0.5—1.5 mm，顶端是铂或氧化铱。全世界约有30名患有瘫痪的人安装了这种装置。他们借助这种植入物用自己的思想控制电脑、玩电子游戏和控制机械臂。但这种侵入性技术对身体的长期影响还没完全探明。

减少侵入性

电极等人工植入物在大脑中可能引发免疫反应，使附近的组织发炎并留下疤痕。刚性电极和大脑软组织间的机械失配性加剧了免疫反应，反过来也降低了电极的性能。寻找耐用的、生物相容的、适用于电极和基板的电性能的材料，成为物理学和材料学面临的一个挑战。比较有希望的候选材料包括柔韧的导电聚合物以及极薄的电导体，如碳纳米管和硅纳米线等。

通过改进现有的医疗技术也可以降低手术风险，比如神经科技公司 Synchron 开发的“stentrodes”(支架电极记录阵列)。这是一种安装在永久植入大脑血管内支架上的电极，它也可以探测到大脑信号，并将数据无线发送给电脑。美国 Neuralink 公司在2019年宣布开发出一款新的脑机接口技术，是通过手术机器人将1024个或更多的柔性电极植入大脑。目前美国食品药品监督管理局已经批准该方法用于人体实验。由于神经电极具有高空间分辨率和快速响应的特点，无论采用哪种植入形式，基于电极的脑机接口都将继续发挥着重要作用。与此同时非侵入性技术也在迅速发展。

光子探测大脑

在电磁波谱中，近红外光(NIR)的波长在700—1400 nm之间，只要



手术解决方案。Blackrock 神经科技公司的 Utah 阵列是一种植入电极阵列，许多研究人员和临床医生使用它来创建脑机接口

功率密度控制在每平方厘米毫瓦以下，就可以穿过头骨并穿透大脑几厘米深，且不会造成伤害。一种被称为“光生物调节”的非侵入性近红外方法已经表明可以刺激大脑。光被认为可以增强细胞功能或减少炎症，但仍需要更多的研究来确定其机制。

第二种非侵入性方法被称为“功能性近红外光谱”(fNIRS)，该方法使用近红外光测量大脑血液循环中血红蛋白吸收光的变化。因为脱氧血红蛋白吸收近红外光的方式与氧合血红蛋白吸收近红外光的方式不同，该技术可以用来绘制大脑活动图谱。测量两个不同波长近红外光在大脑特定部位的不同衰减，可以显示出不同脑区域的活跃度。美国 Kernel 公司正在开发一款头盔式装置，它包括覆盖头骨的52个模块，每个模块都有690 nm和850 nm的激光源和一个探测器。2021年，该设备被美国食品药品监督管理局批准用于测试大脑对迷幻药物的反应。由于含氧血流的形成过程需要几秒钟，fNIRS信号的响应速度如果用于控制外部设备就太慢了，但它提供了比脑电图更高的空间分辨率和更好的信噪比，可以更准确地定位大脑活动。fNIRS头盔甚至可以在自由移动中监测大脑活动。



创新设计。(左) Kernel公司的Flow2头盔使用功能性近红外光谱来绘制大脑活动图；(中)诺丁汉大学的衍生公司Cerca Magnetics制造了一种坚硬的OPM-MEG头盔，适合大多数四岁的孩子；(右)医学物理研究人员与一家模型制作机构合作，制作了一款3D打印的定制OPM-MEG头盔，旨在完美贴合每个人的头型

一种被称为“事件相关光信号”(EROS)的方法可以用红外光测量大脑皮层组织光学特性的变化从而实现更快的测量。当神经元活跃时，光与神经组织的相互作用会发生变化，光散射增加，延长了光子穿过大脑的路径，从而延迟了到达探测器的时间。

有磁性的大脑

另一种追踪大脑神经活动的非侵入性方法是“功能性磁共振成像”(fMRI)。常规的核磁共振成像是在强磁场中检测体内水和脂肪中质子的行为，从而对身体结构成像。fMRI检测的是脑部血流信号，它取决于血红蛋白的氧合水平。与fNIRS一样，fMRI也可以标记神经活动的区域，而且空间分辨率达到1 mm。信号响应速度也是几秒，对于大脑控制外部设备来说还是太慢了。而且fMRI还需要大型、昂贵的超导磁体装置。

非侵入性的“脑磁图”(MEG)具有更快的响应时间，它检测的是飞特斯拉级的神经活动磁场，这种磁场由活跃神经元间的离子流产生。放置在头皮附近的敏感超导量子干涉(SQUID)设备能够测量这种

磁场，但要防止磁干扰，这个设备需要放置在屏蔽室内。MEG能提供1—2 mm的空间分辨率和毫秒级的响应时间，但它也需要庞大的设备和高额的运行成本。

“光泵磁强计”(OPM)是一种新型的探测器，它能在室温下测量大脑的磁场。OPM中有一个充满碱金属原子蒸气的小腔室。用一个调谐到特定量子跃迁的激光二极管对蒸气进行光学泵浦而使原子磁矩对齐。这个磁化与大脑磁场相互作用，改变了已经由探测器确定过的蒸气的不透明度，从而测量到脑的磁场。

英国Cerca Magnetics公司开发了OPM-MEG可穿戴式脑部扫描仪。该设备是一个覆盖了全头的头盔，含有50个乐高积木大小的单元。可穿戴的OPM-MEG脑机接口设备可以在受试者身体移动时检测到神经信号，并且凭借其高空间和时间分辨率，能够实现受试者脑控外部设备。

倾听大脑

超声波技术作为一种便携式无创方法已被广泛应用于身体结构成像。在过去的十年里，这项技术已

经发展到“快速功能超声”(fUS)阶段，即利用脑血流的多普勒测量来识别活跃的神经元。在fUS中，探头产生超声平面波，并通过数百个通道收集信号。随后计算机合成聚焦波并分析数据从而快速生成大脑功能的高分辨率图像。超声也能用于经颅超声刺激(TUS)，这

是一种调节神经活性的方法，具有定位到大脑内几立方毫米范围的精度。有人体试验表明，TUS可以治疗如疼痛和抑郁症等神经或精神病症。

非侵入式脑机接口的未来

非植入的物理方法具有最小的侵入性，可以使脑机接口更安全、更便宜，以及更广泛地用于医疗。它们现在作为植入式的补充，或许有一天能取代植入式。但是非侵入式技术由于远没有达到植入式技术所能达到的空间分辨率，其应用于医疗场景还有很长的路要走。著名神经科学家克里斯托夫·科赫(Kristof Koch)表示，未来拥有一个安全的脑机接口，将大脑与计算机连接起来，人们可以直接将信息下载到大脑中，这将是多么奇妙。

随着消费型神经技术的兴起，神经伦理学家指出，如果没有有效的监管，可能会带来隐私和精神控制等方面的社会问题。非侵入式脑机接口发展的这些年里，科研人员已经极大地推进了大脑的研究和治疗，并用以帮助严重残疾人恢复自理。与此同时，科研人员也应该意识到将非侵入式设备用在实验室和临床之外可能引发的伦理困境。