

脑机接口技术研究综述

王荣胜，宁辉，杨志，杨鹏伟

河南理工大学，计算机学院

摘要：脑机接口，是指在人或动物大脑与外部设备之间创建的直接连接，从而实现脑与设备的信息交换。当人类思考时，大脑皮层中的神经元会产生微小的电流。人类进行不同的思考活动时，激活的神经元也不同。而脑机接口技术便可以靠直接提取大脑中的这些神经信号来控制外部设备，它会在人与机器之间架起桥梁，并最终促进人与人之间的沟通，创造巨大价值。近期以来，脑机接口技术迎来了大的发展。本文系统描述了脑机接口的由来、实现、现状、发展和目前的应用场景。

关键词：脑机接口；信号处理；人工智能；

想象一下，如果有一天你醒来发现全身动弹不得，只能眨眨眼，你会怎么办？

法国时尚杂志 ELLE 主编鲍比就经历了这种事情。他现在只能躺在病床上，四肢无法动弹，甚至一点声音都发不出，唯一能做的只是眨一眨左眼。语言治疗师亨瑞特对他尽心照料，鲍比想对她说声谢谢，他需要在亨瑞特一遍遍复述法语字母表的时候，眨五次眼睛，才能“拼写”出 MERCI 这个法语单词。鲍比因为突如其来的中风，全身肌肉瘫痪，进入了完全闭锁的状态（Locked-in Syndrome），眨动左眼是他唯一和外界交流的方式，可是他的大脑和思维是完全鲜活而正常的，这种孤独与绝望可想而知。不可思议的是，鲍比竟然靠眨眼睛“写”出了一本回忆录《潜水钟与蝴蝶》，同名电影 2008 年获金球奖。在我主讲的《神经工程原理》课上，每当讲到“脑机接口”(Brain Computer Interface, BCI)的时候，一定会给学生推荐这部感人至深的电影，因为我和所有从事神经工程研究的同行们都坚信，总有一天脑机接口技术会帮助鲍比这样的病人，让他们不再生活在密闭的“潜水钟”里，通过脑电或者神经活动自由地表达自己，让思想可以像“蝴蝶”一样自由地飞翔。

其实像鲍比这样思维被封闭在瘫痪身体中的病人不在少数，著名物理学家霍金就是类似的状况，他患有肌萎缩性脊髓侧索硬化症（ALS），也就是 2014 年夏天流行的“冰桶挑战”提醒公众关注的“神经渐冻症”。中国有一位年轻的神经渐冻症病人王甲，他也用“眨眼睛”的方式写了本书《人生没有假如》。“神经渐冻症”的发病原因还没有研究清楚，目前也没有治疗和康复的办法。病人在发病初期出现肌肉无力萎缩的症状，随着病程发展，逐渐失去运动、说话和吞咽能力，甚至需要呼吸机帮助呼吸。高位截瘫、重症肌无力等疾病也会带来运动和沟通的困难，他们同样需要脑机接口的帮助。

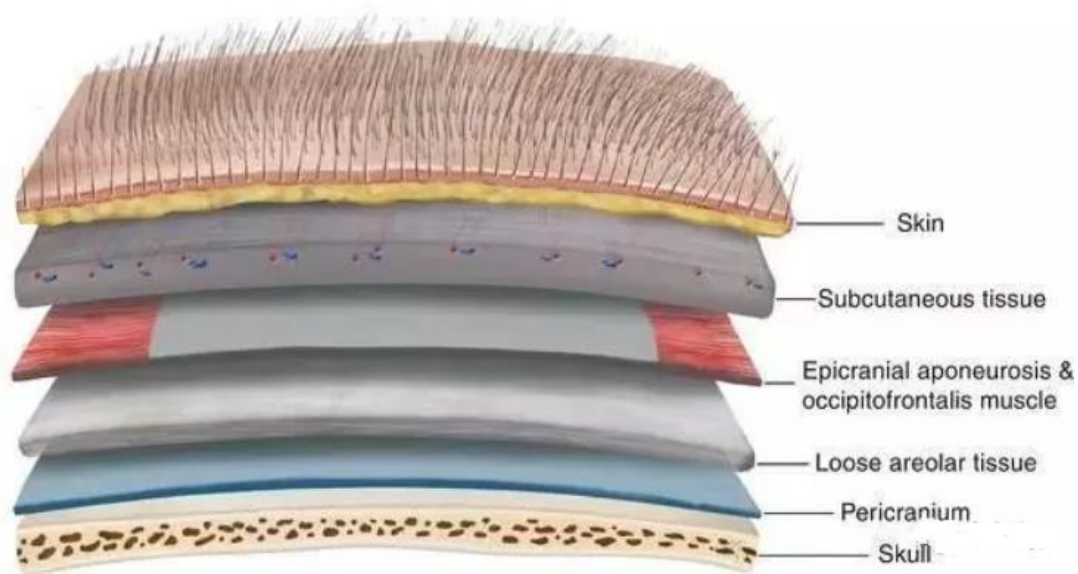
本文以脑机接口为论述对象，较为系统的概述脑机接口的由来、实现、现状、发展和目前的应用场景。

一、脑机接口的由来

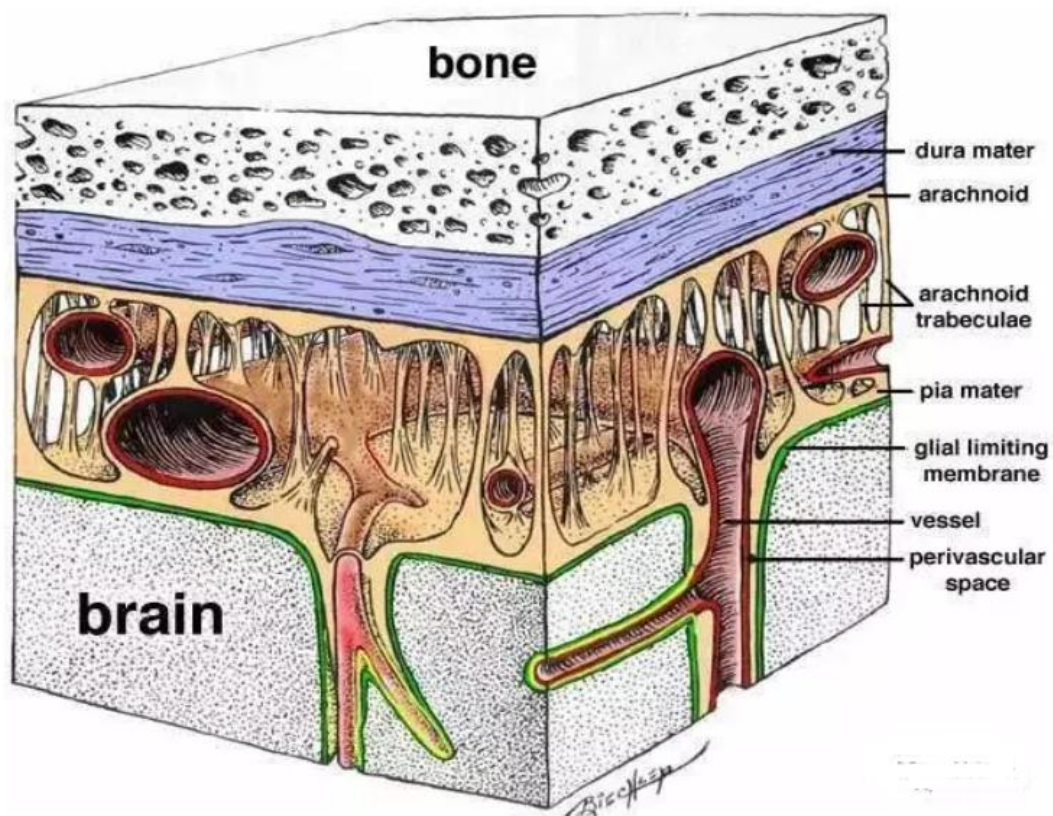
1.1 关于人的大脑

在介绍脑机接口之前，我们非常有必要来了解一下人的大脑。

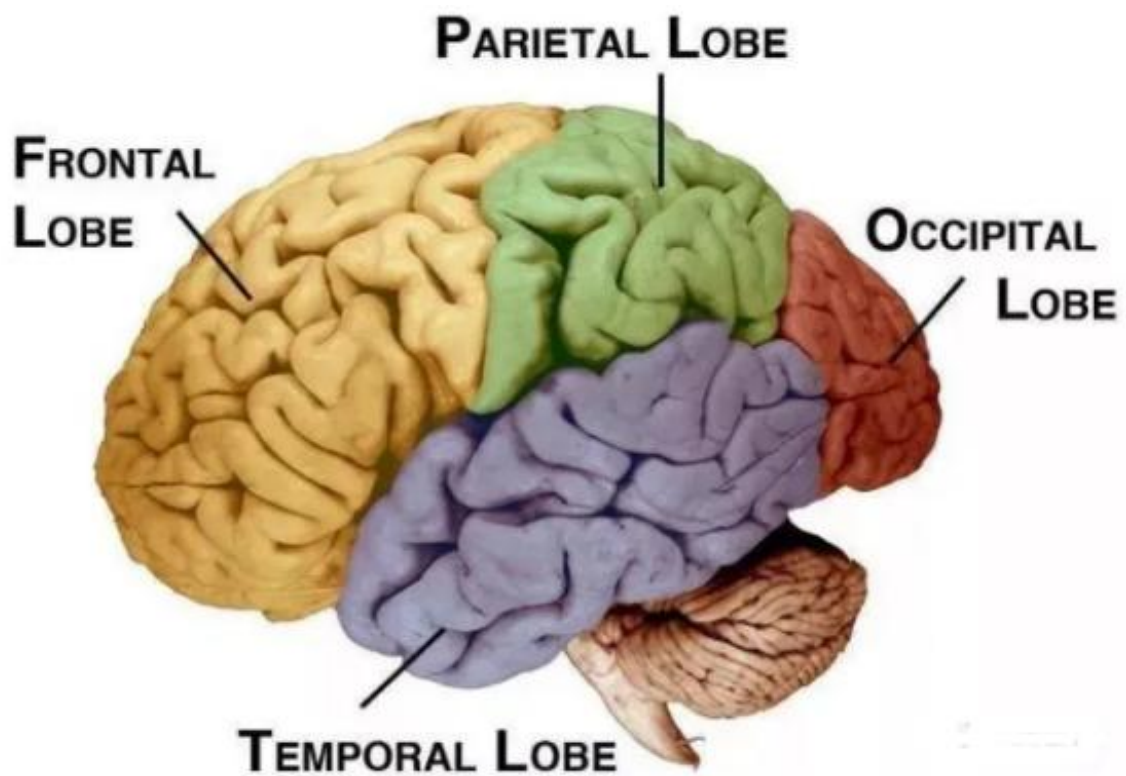
人类头部最外层是头发，头发下面是头皮，然后你以为接下来就到颅骨了——但其实中间还有大概 19 层东西才到颅骨。



在你的颅骨和大脑之间，又有这样一堆的东西（如下图），在颅骨下面，大脑被三层薄膜包裹着，它们分别是硬脑膜、蛛网膜、软脑膜。



作为整个大脑最重要的部位，大脑的皮质层几乎无所不能——它负责处理听觉、视觉及感觉信息，同时还掌管着语言、运动、思考、计划、性格等诸多方面。



整个大脑皮质层每个部位所做的东西都很多，而且彼此之间存在大量重叠的功能，不过我们可以简单概括为如下这张图：



所以不同类型的脑机接口需要获取不同区域的大脑皮质层发出的信号。

1.2 脑机接口开始

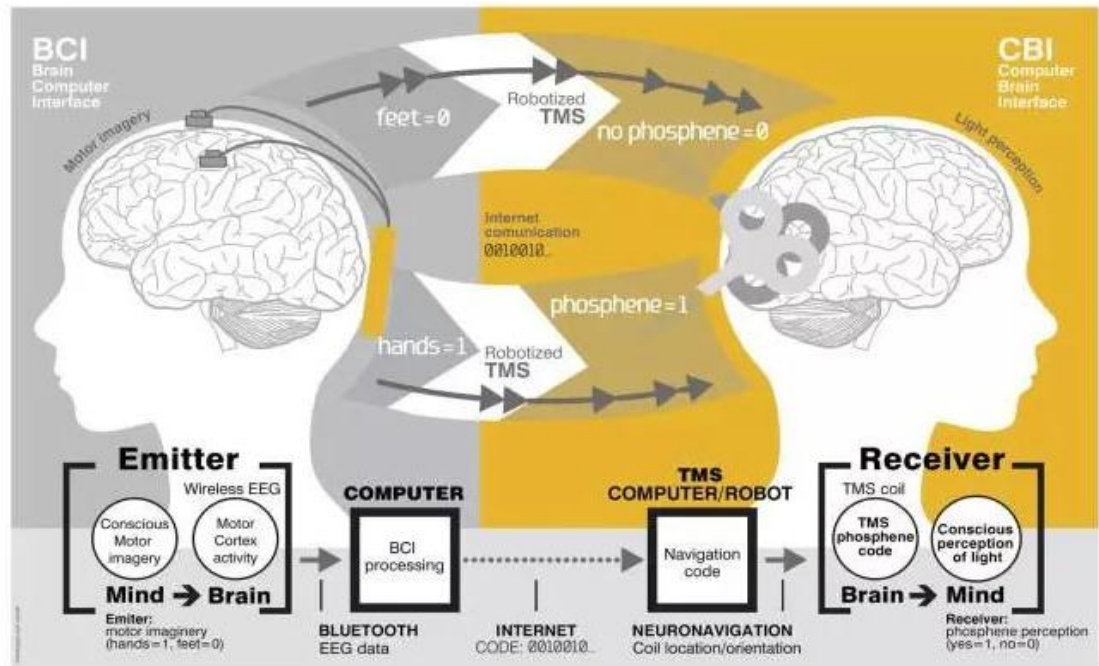
科学家最早尝试脑机接口研究，是在 1963 年的英国。Burden Neurological Institute 的 Grey Walter 医生用当时非常前沿的脑电技术和他的病人开了个“玩笑”。这些癫痫病人因为确定脑内病灶的需要，做了手术，脑内放了电极，贴近大脑皮层，可以获取非常清晰的神经活动。因为电极比较大，记录阻抗低，虽然不能记录单个神经细胞的放电，但能记录到电极周围神经细胞共同活动的场电位 (Field Potentials)。这些病人会带着电极在医院生活一两周。Walter 医生突发奇想，在病人们欣赏风光幻灯片的时候，偷偷把脑电电极连接到了自己发明的“电位转换器”上，把病人运动皮层的场电位信号，转换成了幻灯机换片的控制信号。于是“心想事成”的奇迹发生了：病人每次打算换片，但还没有按动按钮时，幻灯机就已经知道了他的想法，自动换片了！这是脑机接口技术的第一次完整实现：采集大脑神经信号，翻译转换后控制外部设备。

这个概念在当时非常超前，只有科幻电影中才会出现。这个“玩笑”背后是 Walter 医生通过对脑电活动的定量测量和深入探索，发现了与注意和期待有关的脑电活动。在此之前，所谓“脑电”仅仅指每秒 10 次左右的节律性起伏 (Alpha 波)，通过这种起伏可以推测人脑的警觉状态，不能反映精细的思维活动。Walter 医生也是个非常优秀的工程师，他采用多次平均技术，去除噪声，得到脑电发明以来最“纯净”的脑内活动波形——事件诱发电位 (Event Related Potential, ERP)，从此科学家通过事件诱发电位定量研究大脑对外界视觉听觉刺激的响应规律，以及大脑内部认知过程的展开，从此打开了一扇研究人脑的新窗口。

1.3 脑机接口技术

脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI)：它是在人或动物脑 (或者脑细

胞的培养物）与计算机或其他电子设备之间建立的不依赖于常规大脑信息输出通路（外周神经和肌肉组织）的一种全新通讯和控制技术。



在该定义中，“脑”意指有机生命形式的脑或神经系统，而并非仅仅是“mind”（抽象的心智）。“机”意指任何处理或计算的设备，其形式可以从简单电路到硅芯片到外部设备和轮椅。“接口”=“用于信息交换的中介物”。

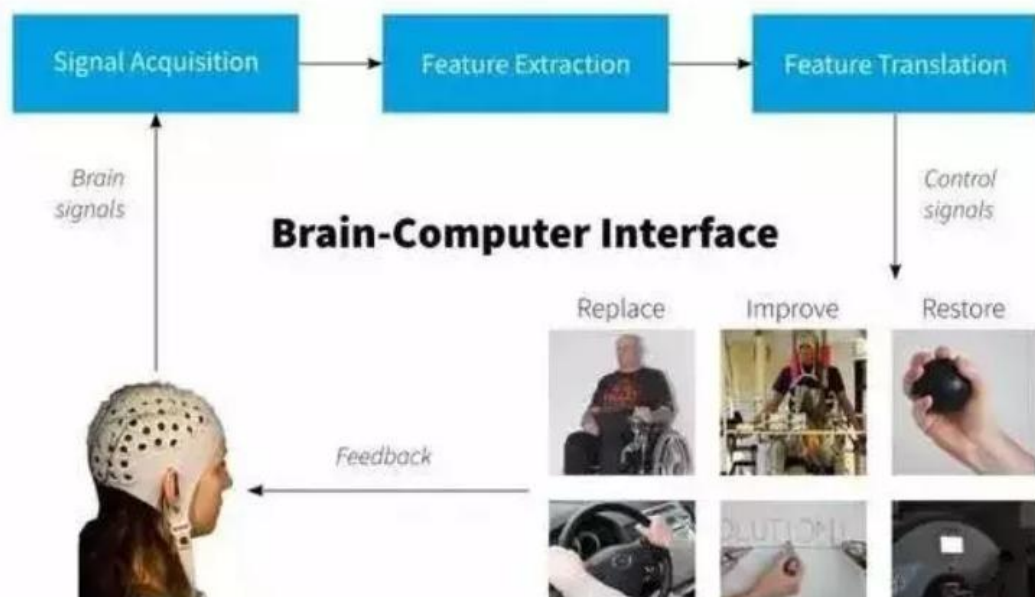
“脑机接口”的定义=“脑”+机“+”接口”。即，在人或动物脑（或者脑细胞的培养物）与外部设备间创建的用于信息交换的连接通路。

脑机接口作为当前神经工程领域中最活跃的研究方向之一，在生物医学、神经康复和智能机器人等领域具有重要的研究意义和巨大的应用潜力，近 10 年来，脑机接口技术得到了长足的进步和飞速的发展，应用领域也在逐渐扩大。

二、脑机接口的实现

脑机接口技术是通过信号采集设备从大脑皮层采集脑电信号经过放大、滤波、A/D 转换等处理转换为可以被计算机识别的信号，然后对信号进行预处理，提取特征信号，再利用这些特征进行模式识别，最后转化为控制外部设备的具体指令，实现对外部设备的控制。

一个典型的脑机接口系统主要包含 4 个组成部分：信号采集部分、信号处理部分、控制设备部分和反馈环节。其中，信号处理部分包括预处理、特征提取、特征分类 3 个环节。

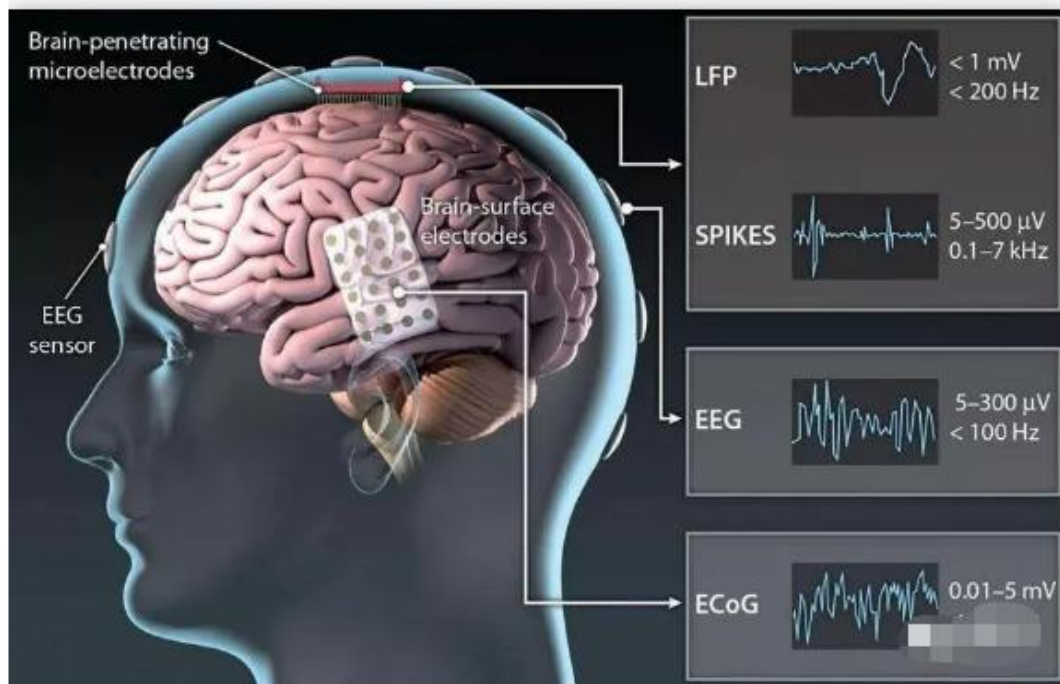


2.1 信息采集

从目前的研究水平来看，我们在评估某种信息采集手段优劣时需要考虑三个方面的标准：

1. 规模——可以记录多少神经元。
2. 分辨率——这个工具接收到的信息的细致程度。这里所说的分辨率可以分成两种：空间上的分辨率（能否细致记录单个神经元的触发情况）和时间上的分辨率（能否确定你所记录的活动的确切发生时间）。
3. 侵入性——是否需要手术？如果需要，手术的影响范围有多大？

而脑机接口的分类，则通常是根据“侵入性”被分为：非侵入式（脑外）、侵入式和半侵入式。



非侵入式：是指无需通过侵入大脑，只需通过附着在头皮上的穿戴设备来对大脑信息进行记录何解读。这种技术虽然避免了昂贵和危险的手术，但是由于颅骨对于大脑信号的衰减作用，以及对于神经元发出的电磁波的分散和模糊效应，使得记录到的信号强度和分辨率并不高，很难确定发出信号的脑区或者相关的单个神经元的放电。

侵入式：是指通过手术等方式直接将电极植入到大脑皮层，这样可以获得高质量的神经信号，但是却存在着较高的安全风险和成本。另外，由于异物侵入，可能会引发免疫反应和愈伤组织（疤痕组织），导致电极信号质量衰退甚至是消失。另外伤口也易出现难以愈合及炎症反应。

半侵入式：即将脑机接口植入到颅腔内，但是在大脑皮层之外。主要基于皮层脑电图（ECoG）进行信息分析。虽然其获得的信号强度及分辨率弱于侵入式，但是却优于非侵入式，同时可以进一步降低免疫反应和愈伤组织的几率。

典型的非侵入式系统有脑电图（EGG），脑电图是有潜力的非侵入式脑机接口的主要信息分析技术之一，这主要是因为该技术良好的时间分辨率、易用性、便携性和相对低廉的价格。



但是，脑电图技术的一个问题是它对噪声的敏感；另一个使用 EEG 作为脑机接口的现实障碍是用户在工作之前要进行大量的训练。

2.2 信息分析

收集好了足够多的信息后，就要进行信号的解码和再编码以处理干扰。脑电信号采集过程中的干扰有很多，如工频干扰、眼动伪迹、环境中的其他电磁干扰等。

分析模型是信息解码环节的关键，根据采集方式的不同，一般会有脑电图（EGG），皮层脑电图（ECoG）等模型可以协助分析。

信号处理、分析及特征提取的方法包括去噪滤波、P300 信号分析、小波分析+奇异值分解等。

2.3 再编码

将分析后的信息进行编码，如何编码取决于希望做成的事情。比如控制机械臂拿起咖啡杯给自己喝咖啡，就需要编码成机械臂的运动信号，在复杂三维环境中准确控制物体的移动轨迹及力量控制都非常的复杂。

但编码形式也可以多种多样，这也是脑机接口可以几乎和任何工科学科去结合的原因。最复杂的情况包括输出到其他生物体上，比如小白鼠身上，控制它的行为方式。

2.4 反馈

获得环境反馈信息后再作用于大脑也非常复杂。人类通过感知能力感受环境并且传递给大脑进行反馈，感知包括视觉、触觉、听觉、嗅觉和味觉等等。

脑机接口要实现这一步其实是非常复杂的，包括多模态感知的混合解析也是难点，因为反馈给大脑的过程可能不兼容。

三、脑机接口的现状

人和动物的大脑,特别是皮层细胞,存在着频繁的自发电活动,无需任何外界刺激。从脑电极记录到的电位是对脑部大量神经元活动的反应,低至微伏级,这种电活动的电位随时间的波动称为脑电波(EEG)。

EEG 反应了大脑组织的电活动及大脑的功能状态,脑的复杂活动反应在头皮上的电位活动就是 EEG 轨迹。所以理论上,人的意图通过脑电应该可以被探测识别出来。

BCI 的先驱曾经指出“在理论上,脑的感觉、运动及认知意识在自发 EEG 中应该是可辨识的”,因此 EEG 成为 BCI 研究中的常见工具。BCI 技术就是要通过识别这种意图,将之表达为对外部设备的直接控制。

由于脑电信号的本质还未知,难以确定一种特定的信号识别方法。假设脑电信号是线性的,那么大多数 BCI 使用的线性识别方法足以应用。反之,则线性识别算法对于希望被识别的信号可能是最糟糕的描述。但无论何种情况,BCI 技术的首要任务就是从 EEG 中识别出人的主观操作意识,并将之表达为对外部设备的直接控制。同样的道理,基于皮层脑电图(EECoG)的信息分析也与之类似。

3.1 脑机接口研究中所使用的脑神经信号

3.1.1 P300 (诱发电位)

P300 是一种事件相关电位(ERP),在时间相关刺激 300~400ms 后出现的正电位,主要位于中央皮层区域,其峰值大约出现在时间发生后 300ms,相关事件发生的概率越小,所引起的 P300 越显著。基于 P300 的 BCI 的优点是 P300 属于内部相应,使用者无需通过训练就可产生 P300。

3.1.2 视觉诱发电位(诱发电位)

视觉诱发电位是指从视觉通路的不同水平区域记录的不同生物电反应,其诱发刺激可以是荧光、闪光刺激。视觉诱发电位又可以分成短时视觉诱发电位和稳态视觉诱发电位两种。

3.1.3 时间相关同步或时间相关去同步电位(自发脑电)

单边的肢体运动或想象运动，大脑同侧产生事件相关同步电位（ERS），大脑对侧产生时间相关去同步电位（ERD）。ERS、ERD 是与运动相关的，主要位于感觉运动皮层。

3.1.4 皮层慢电位(自发脑电)

皮层慢电位也称慢波电位（Slow Cortical Potentials, SCPs），是皮层电位的变化，是脑电信号中从 300 ms 持续到几秒钟的大的负电位或正电位，能反应皮层 I 和 II 层的兴奋性，个人可以通过生物反馈训练产生这种电位。

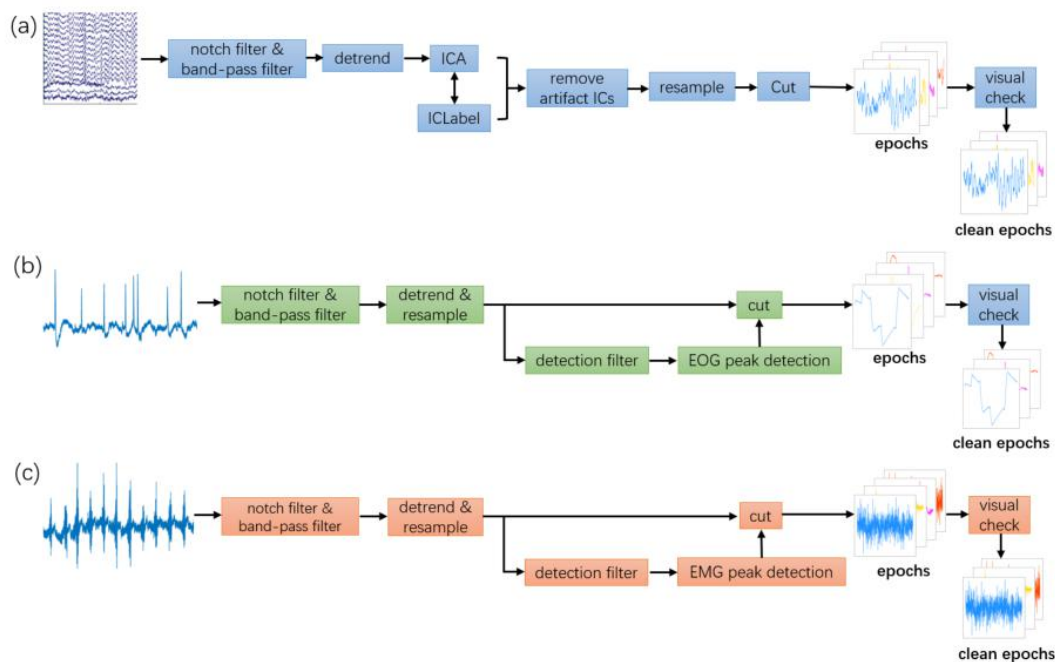
3.1.5 自发脑电信号(自发脑电)

在不同的知觉意识下，人们脑电中的不同节律呈现出各异的活动状态。这些节律是受不同动作或思想的影响。按照所在频段的不同分类，一般采用希腊字母（ α 、 β 、 γ 、 δ ）来表示不同的自发 EEG 信号节律。比如 α 节律在 8~13 Hz 频段，而 β 节律则在 13~22 Hz 频段。

采用以上几种脑电信号作为 BCI 输入信号，具有各自的特点和局限。P300 和视觉诱发电位都属于诱发电位，不需要进行训练，其信号检测和处理方法较简单且正确率高。不足之处是需要额外的刺激装置提供刺激，并且依赖于人的某种知觉（如视觉）。其它几类信号的优点是可以不依赖外部刺激就可以产生，但需要大量的特殊训练。

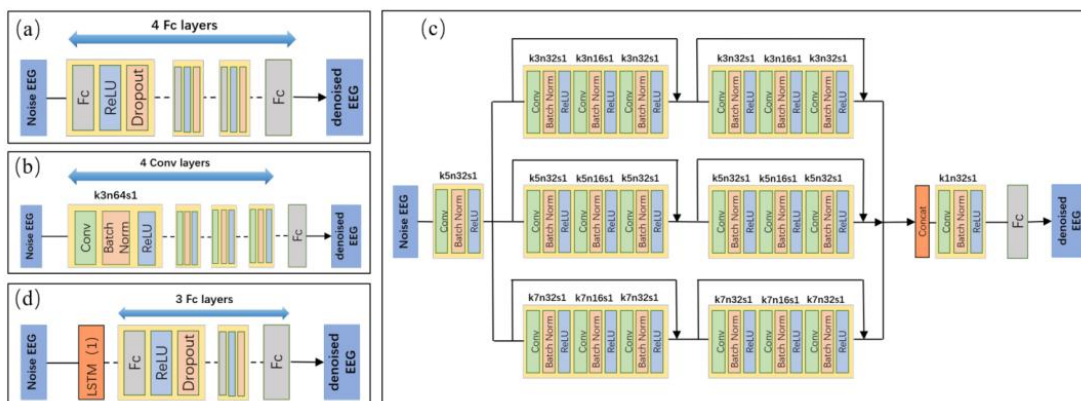
3.2 基于深度学习的脑机信号去噪处理方法

深度学习网络越来越受到各个领域的关注，包括脑电图 (EEG) 的信号处理。这些模型提供了与传统技术相当的性能。然而，目前缺乏具有特定基准的结构化和标准化数据集，这限制了深度学习解决方案在脑电信号去噪方面的发展。为此，学者们提出了 EEGdenoiseNet，一个基准 EEG 数据集，适用于训练和测试基于深度学习的去噪模型，以及跨模型的性能比较。EEGdenoiseNet 包含 4514 个干净的脑电图 epochs、3400 个眼动伪迹 epochs 和 5598 个肌电伪迹 epochs，允许用户用基准真相 (Ground-truth) 干净脑电图生成嘈杂的脑电图 epochs。使用 EEGdenoiseNet 评估了四个经典网络（全连接网络、简单卷积网络、复杂卷积网络和循环神经网络）的去噪性能。结果显示，就算 EEG 信号被噪声严重干扰，深度学习方法也可以有不错的去噪表现。通过 EEGdenoiseNet，学者们希望加快基于深度学习的脑电信号去噪这一新兴领域的发展，从而更有效促进脑机接口技术的快速进步。



获取干净 EEG、EOG 和 MEG 的流程

在对 EEG 数据集进行了完善后，学者们利用四个经典深度学习网络进行了脑机接口信号数据集的去噪验证。



四个用于基准测试的网络架构

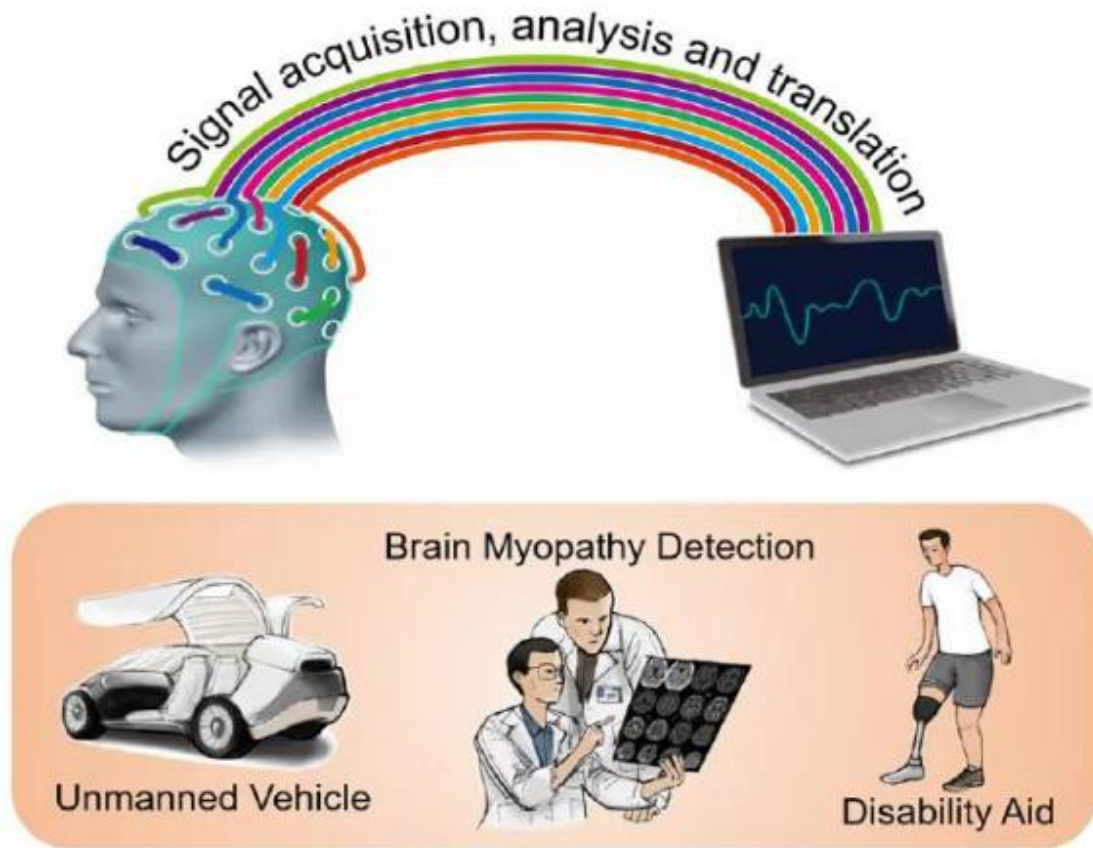
a. FCNN b. Simple CNN c. Complex CNN d. RNN

在利用深度学习网络进行脑机接口信号数据集的验证后，表明深度学习可以为脑机接口技术的信号进行良好的去噪处理，间接促进了脑机接口技术的更快发展。以后，我们希望看到更多深度学习应用案例来推动脑机技术的发展。

3.3 基于新型 EEG 电极信号获取方法

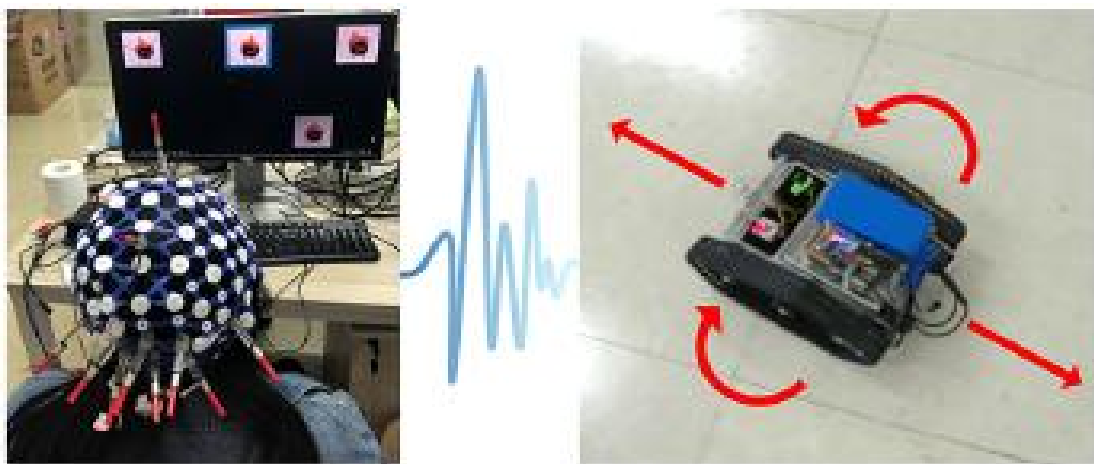
脑机接口 (BCI) 能够在大脑和电子设备之间实现直接和近乎即时的通信。目前最

大的挑战之一是开发一种有效的无创 BCI，它能使记录电极避免人类皮肤上的毛发，同时又不带来使用导电凝胶的不便和隐患。在这项研究中，清华大学研究人员开发了一种低成本、易于制造、柔韧、坚固且不含凝胶的脑电图 (EEG) 电极【银纳米线/聚乙烯醇缩丁醛 (PVB)/三聚氰胺海绵 (AgPMS)】，可以解决头发问题。



无创 BCI 工作原理示意图及典型应用

研究人员还设计了脑电图信号记录和指令映射实验：在毛皮上用 AgPMS 半晶电极 BCI 系统意念控制一辆无人驾驶汽车。




戴着这顶帽子的志愿者可以用意念控制一辆玩具车，让它前进、后退、向左或向右。基于稳态视觉诱发电位 (SSVEP) 在无毛皮肤上的 BCI 应用表明，新电极的 BCI 精度 (86%) 与导电凝胶支撑的传统电极 (88%) 大致相同。而且，AgPMS 在多毛皮肤上的性能并没有明显降低，这表明新电极可以替代传统电极用于无毛和多毛皮肤 BCI 及其他 EEG 应用。

这意味着，将来的脑机技术中，解决毛发影响信号的收集做出了解决。

3.4 微型脑机接口设备出现及无损植入

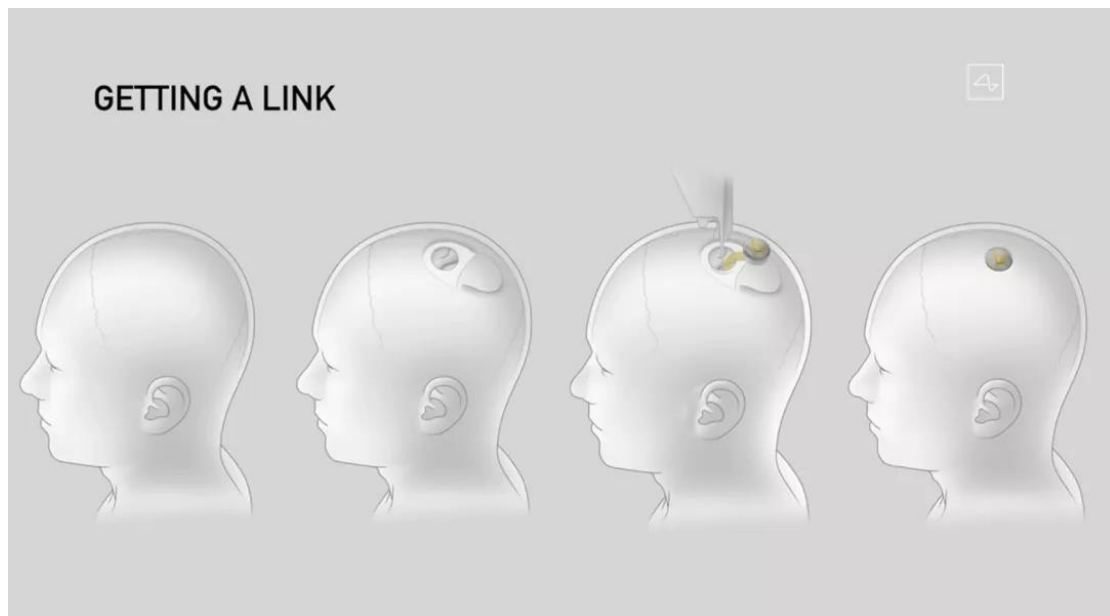
近期，马斯克打造的神奇脑机接口只有硬币大小。

READ & WRITE ON EVERY CHANNEL



Channels	1,024
Battery life	All day
Recharging time	Overnight
Wireless range	5 - 10 meters
Implant size	23 mm x 8 mm
Look	Not externally visible

此前的医学研究，头上戴着一个盒子，连着线，走来走去，会有点儿奇怪。而这次带来的设备将颠覆侵入式脑机接口设备的时代，它以微小、方便著称。当在脑机设备的接入时，把一个硬币大小的头骨弄出来，用「超级胶水」一粘。然后手术结束后就可以到处走了。这也安全到使你可以在手术当天就可以出院。



当在使用时，它就像你的头骨下面插了一个 Fitbit，但是带着电线。白天能用一天，晚上充电就行。

脑机接口的简化和更高效也为脑机的持续发展带来了可能。

四、脑机接口的发展简史

1924 年，德国精神科医生汉斯·贝格尔发现了脑电波。至此，人们发现意识是可以转化成电子信号被读取的。在此之后，针对 BCI 技术的研究开始出现。

不过，直到 20 世纪 60 年代末、70 年代左右，BCI 技术才真正开始成形。

1969 年，研究员埃伯哈德·费兹（Eberhard Fetz）将猴子大脑中的一个神经元连接到了放在它面前的一个仪表盘。当神经元被触发的时候，仪表盘的指针会转动。如果猴子可以通过某种思考方式触发该神经元，并让仪表盘的指针转动，它就能得到一颗香蕉味的丸子作为奖励。渐渐地，猴子变得越来越擅长这个游戏，因为它想吃到更多的香蕉丸子。这只猴子学会了控制神经元的触发，并在偶然之下成为了第一个真正的脑机接口被试对象。

1970 年，美国国防高级研究计划局（DARPA）开始组建团队研究脑机接口技术。

1978 年，视觉脑机接口方面的先驱 William Dobelle 在一位男性盲人 Jerry 的视觉皮层植入了 68 个电极的阵列，并成功制造了光幻视（Phosphene）。该脑机接口系统包括一个采集视频的摄像机，信号处理装置和受驱动的皮层刺激电极。植入后，病人可以在有限的视野内看到灰度调制的低分辨率、低刷新率点阵图像。该视觉假体系统是便携式的，且病人可以在不受医师和技师帮助的条件下独立使用。

BCI 技术的另一个发展高潮集中在 20 世纪 90 年代末 21 世纪初。

1998 年，“运动神经假体”的脑际接口方面的专家，Emory 大学的 Philip Kennedy 和 Roy Bakay 在患有脑干中风导致的锁闭综合症的病人 Johnny Ray 脑中植入了可获取足够高质量的神经信号来模拟运动的侵入性脑际接口，成功帮助 Ray 通过该脑机接口实现了对于电脑光标的控制。

同样是在 1998 年，在 John Donoghue 教授的带领下，布朗大学的科学家团队开发出可以将电脑芯片和人脑连接的技术，使人脑能对其他设备进行远程控制。这项技术要求进行脑部手术，然后用电线将人脑和大型主机相连，研究人员称这项技术为 BrainGate。

随后，在 1999 年和 2002 年的两次 BCI 国际会议的召开，也为 BCI 技术的发展指明了方向。

2005 年，Cyberkinetics 公司获得美国 FDA 批准，在九位病人进行了第一期的运动皮层脑机接口临床试验。四肢瘫痪的 Matt Nagle 成为了第一位用侵入式脑机接口来控制机械臂的病人，他能够通过运动意图来完成机械臂控制、电脑光标控制等任务。其植入物位于前中回的运动皮层对应手臂和手部的区域。该植入称为 BrainGate，是包含 96 个电极的阵列。

2009 年，美国南加州大学的 Theodore Berger 小组研制出能够模拟海马体功能的神经芯片。该小组的这种神经芯片植入大鼠脑内，使其称为第一种高级脑功能假体。

2012 年巴西世界杯——机器战甲，身着机器战甲的截肢残疾者，凭借脑机接口和机械外骨骼开出了一球。

2014 年，华盛顿大学的研究员通过网络传输脑电信号实现直接“脑对脑”交流。

2016 年 8 月，8 名瘫痪多年的脊髓损伤患者，通过不断训练，借用脑机接口控制仿生外骨骼，利用 VR 技术解决触觉的反馈问题，他们的下肢的肌肉功能和感知功能得到部分恢复。

2016 年 9 月，斯坦福大学神经修复植入体实验室的研究者们往两只猴子大脑内植入了脑机接口，通过训练，其中一只猴子创造了新的大脑控制打字记录——1 分钟内打出了 12 个单词，即莎士比亚的经典台词“To be or not to be. That is the question”。

2016 年 10 月，世界第一届 Cybathlon 半机械人运动会在瑞士苏黎世正式拉开帷幕，来自 21 个国家、一共 50 支队伍的残疾人运动员在辅助设备的帮助下参加比赛。赛事共分为 6 个比赛项目：动力假肢竞赛（上肢和下肢）、外骨骼驱动竞赛、功能性电刺激自行车赛、轮椅竞赛、脑机交互竞赛。

2016 年 11 月，荷兰乌特勒支大学医学院神经科学家和首席研究员 Nick Ramsay 成功一名肌萎缩侧索硬化（ALS）的闭锁综合征女患者 de Bruijne 将脑机接口技术从实验室带入了家庭环境中，无需医疗人员协助也能与他人进行思想交流。脑机接口植入 28 周后，de Bruijne 已经能够准确和独立地控制一个计算机打字程序，差不多一分钟可以打出 2 个字母，准确率达到 95%。

2016 年 12 月，美国明尼苏达大学的 Bin He 与他的团队取得一项重大突破，让普通人在没有植入大脑电极的情况下，只凭借“意念”，在复杂的三维空间内实现物体控制，包括操纵机器臂抓取、放置物体和控制飞行器飞行。经过训练，试验者利用意识抓取物体的成功率在 80% 以上，把物体放回货架上的成功率超过 70%。该研究成果有望帮助上百万的残疾人和神经性疾病患者。

2017 年 2 月，斯坦福大学电气工程教授 Krishna Shenoy 和神经外科教授 Jaimie Henderson 发表论文宣布他们成功让三名受试瘫痪者通过简单的想象精准地控制电脑屏幕的光标，这三名瘫痪患者成功通过想象在电脑屏幕上输入了他们想说的话，其中一名患者可以在 1 分钟之内平均输入 39 个字母。

2017 年 4 月，Facebook 在 F8 大会上宣布了“意念打字”的项目，希望未来能通过脑电波每分钟打 100 个字，比手动打字快 5 倍。专业人士称，Facebook 的“意念打字”是扫描大脑海马体里语言这块的信息，记录说话之前和说话过程中细胞里的变

化。从透露的信息获知，他们尝试通过血液的温度信息来做判断。

2018 年 9 月，美国军事研究机构——国防部高级研究计划局（DARPA）公布了一个 2015 年启动的项目，这个项目研发的新技术能够赋予飞行员借助思维同时操控多架飞机和无人机的能力。据 DARPA 生物技术办公室的负责人 Justin Sanchez 称：“目前大脑信号已经能够用于下达命令，并且同时操控三种类型的飞机。”

2018 年 11 月，BrainGate 联盟发表了一项最新研究成果，在名为“BrainGate2”的临床试验中，三名瘫痪患者可以在新型脑机接口芯片的帮助下，利用“意念”自主操作平板电脑，并操作多种应用程序。

2019 年 4 月，加州大学旧金山分校（UCSF）的神经外科学家 Edward Chang 教授与其同事开发出一种解码器，可以将人脑神经信号转化为语音，为帮助无法说话的患者实现发声交流完成了有力的概念验证。

2019 年 7 月 17 日，Space X 及特斯拉创始人埃隆·马斯克召开发布会，宣布成立两年的脑机接口（BCI）公司 Neuralink 的脑机接口技术获重大突破，他们已经找到了高效实现脑机接口的方法。这实际上是一套脑机接口系统：利用一台神经手术机器人在脑部 28 平方毫米的面积上，植入 96 根直径只有 4-6 微米的“线”，总共包含 3072 个电极，然后可以直接通过 USB-C 接口读取大脑信号。与以前的技术相比，新技术对大脑的伤害更小，传输的数据也更多。

2019 年 7 月 30 日，Facebook 一直资助的加州大学旧金山分校（UCSF）的脑机接口技术研究团队，首次证明可以从大脑活动中提取人类说出某个词汇的深层含义，并将提取内容迅速转换成文本。

五、脑机接口技术的应用与市场前景

脑机接口（BCI）技术的应用前景非常的广阔，比如可以帮助人们直接通过思维来控制基于 BCI 接口的机器人，从事各种工作。脑机接口机器人不仅在残疾人康复、老年人护理等医疗领域具有显著的优势，而且在教育、军事、娱乐、智能家居等方面也具有广阔的应用前景。

5.1 医疗健康

医疗方向主要分为两个方向，分别是“强化”和“恢复”，这两个方向都有着极其远大的“钱景”，尤其是强化方向。现阶段以恢复类为主，因为更易实现。

“强化”方向主要是指将芯片植入大脑，以增强记忆、推动人脑和计算设备的直接连接。这就是所谓的“人类增强”（Human Intelligence, HI）。浅层次的研究是脑机单向，更深一层次的将是机脑双向。目前，在做“强化”方向的就包括马斯克创办的 Neuralink 以及获得 1 亿美元投资的 Kernel。

“恢复”方向主要是指可以针对多动症、中风、癫痫等疾病以及残障人士做对应的恢复训练，采取的主要方式是神经反馈训练。这一方向在全球的一些医院、诊所、康复中心中已经得到广泛应用，也有不少创业公司在做这方面的可穿戴设备。

具体来说，BCI 技术可以帮助患者和用户实现：

（1）与周围环境进行交流：BCI 机器人可以帮助残疾人使用电脑、拨打电话等；
（2）控制周围环境：BCI 机器人可以帮助残疾人或老年人控制轮椅、家庭电器开关等；

（3）运动康复：BCI 康复机器人可以帮助残疾人或失去运动能力的老年人进行主动康复训练，BCI 护理机器人可以从事基本护理工作，提高残疾人或老年人的生活质量。

（4）重获肢体能力：基于 BCI 机器人的义肢可成功帮助肢体残疾的残障人士重新获得肢体控制的能力。

（5）重获缺失的感知能力：除了通过思维控制一些设备之外，未来甚至有望帮助部分丧失的感知能力的人群再次获得感知能力，比如视觉、听觉和触觉等；此外，还可以将非人类感知能力转变为人类感知能力，这其实是非常逆天的，比如对于超声波的感知能力（就像从蝙蝠身上获取这个能力一样），再比如感知磁场等，就像拥有了超能力！

“强化”方向少的原因：第一是因为实现难度高；第二是因为市场还未被充分教育，思维范式在短期内难以改变，付费意愿因技术能力不足而未达到临界值，但军用领域实际上已经有了不少的应用了，军方也投入了大量资金。

最后，还值得补充的是“保健方向”，也就是冥想减压，有创业公司推出脑波检测头环，帮助用户通过实时音频反馈来提升冥想效果。其实，在北美，冥想的市场是非常大的，这是一个绝对可以挖掘的细分市场。

5.2 娱乐

在娱乐方面，BCI 技术的前景也是非常的广阔，比如可以与虚拟现实技术结合，无需额外的外设操控设备，可以直接通过思维来控制游戏中的角色，获得更加沉浸式的游戏体验。目前，在这块做得比较超前的公司是 MindMaze，其融资总额已超 1 亿美元。

5.3 教育

这个方向其实和医疗方向中的“恢复”方向会有些接近。教育科技是个千亿级的市场，目前，脑机接口创业公司 BrainCo 就在做这一方向，主要是对学生注意力值的实时探测和训练，既可以而帮助老师及时了解课堂情况改变教学情况，也能够帮助学生提高注意力。

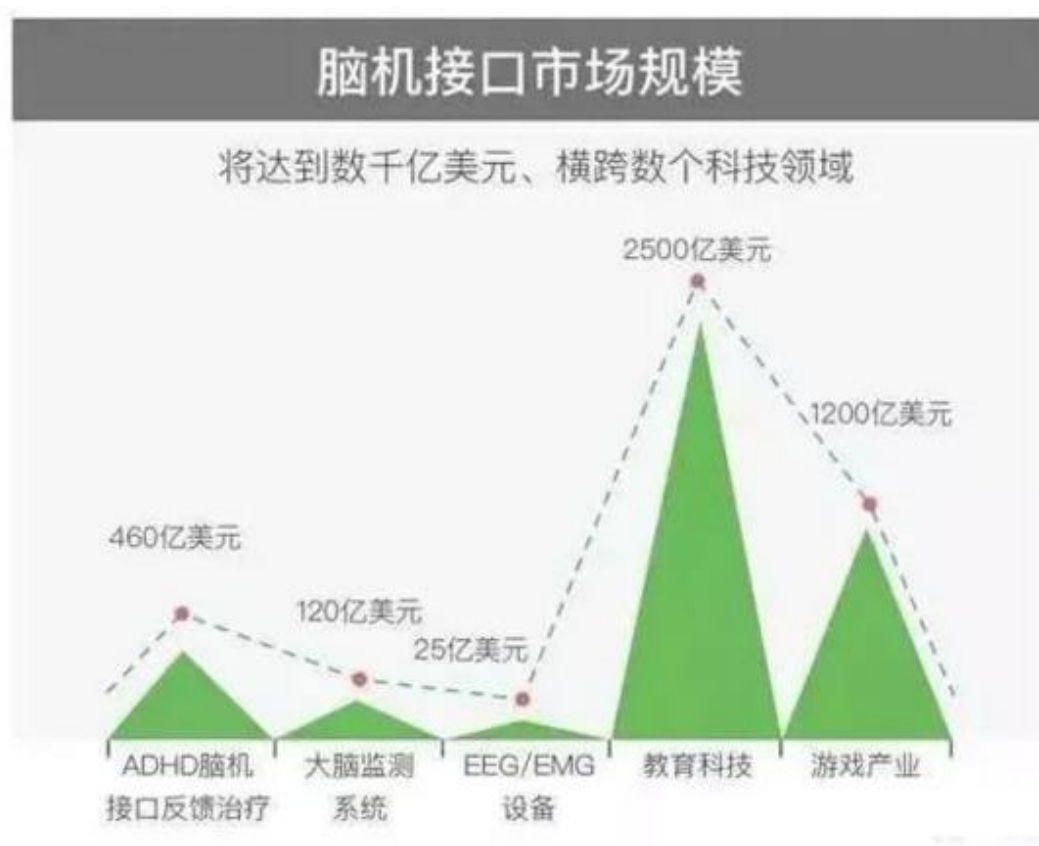
5.4 智能家居

智能家居是脑机接口与 IoT（物联网）跨领域结合的一大想象空间。在这一领域，脑机接口扮演的角色类似于“遥控器”，帮助人们用意念控制开关灯、开关门、开关窗帘等，进一步可以控制家庭服务机器人。

5.5 军事

在军事方面，BCI 技术可以帮助军人更好的操控无人机、无人车、机器人等设备，代替军人或者特殊职业的人士从事各种危险的任务，以及在不适宜人工操作的环境中工作。也可以帮助军人获得能力上的增强，比如通过 BCI 控制外骨骼机器人提升单兵作战能力。

根据第三方研究机构的测算，单纯从脑机接口设备（EEG/EMG）的维度来看，市场规模在 5 年内将达到 25 亿美元。如果从脑机接口将深度影响的数个科技领域来看，市场规模在 5 年内将达到数千亿美元，其中包括：ADHD 脑机接口反馈治疗 460 亿美元，大脑监测系统 120 亿美元，教育科技 2500 亿美元，游戏产业 1200 亿美元。



总结来说，脑机接口作为一种全新的控制和交流方式，还可以应用到更广阔的脑机融合领域，就是所谓的硅基生物和碳基生物的融合，打造超强人类，让人脑进一步自然延伸。

脑机接口的发展对脑电的机理、脑认知、脑康复、信号处理、模式识别、芯片技术、计算技术等各个领域都提出了新的要求，人们也会大大加深对大脑的结构和功能认识。

随着技术的不断完善和多学科融合的努力，脑机接口必将逐步应用于现实，造福人类。

六、参考

[1]刚刚！马斯克震撼发布脑机接口，Neuralink 无损植入猪脑，下一步植入人脑：

<https://mp.weixin.qq.com/s/NN6BTpULIYFHu8xjsN2wIQ>

[2]一种灵活，坚固且无凝胶的脑电图电极，可用于无创脑机接口：

<https://mp.weixin.qq.com/s/ITuhvKEYNz90HlbiYoNJ0A>

[3]EEGdenoiseNet: 一个适用于深度学习模型的脑电去噪的基准数据集：

<https://mp.weixin.qq.com/s/xgTECEeJVRv2j9OK5PJ DYQ>

[4]什么是脑机接口技术：

<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1679238208066282019&wfr=spider&for=pc>

[5]从霍金到阿凡达：脑机接口的现状与未来：

http://www.360doc.com/content/16/0817/21/305621_583946422.shtml

[6]探索思维的力量探索思维的力量:脑机接口研究现状与展望：

<https://www.ixueshu.com/document/e4859208ffe87b8190aa6f73a4d8e9d5318947a18e7f9386.html?null>