



# 脑机接口发展进展与典型案例研究

姚国章<sup>1,2</sup>

1. 南京邮电大学管理学院, 2. 数字经济研究所, 江苏 南京 210003

**摘要:**脑机接口(brain-computer interface, BCI)作为融合生物脑与智能机器的前沿技术,正在重塑神经疾病诊疗与人类机能增强的技术范式。文章通过解构脑机接口的技术发展图谱,系统比较侵入式与非侵入式技术的性能特征,分析当前技术发展面临的多重挑战,并结合Neuralink侵入式芯片与强脑科技非侵入式脑机接口的实践案例,揭示技术演进规律。文章认为,需要大力推动脑机接口技术的临床转化与规模化应用,培育行业发展生态,打造全球脑科学创新策源地。

**关键词:**脑机接口; 侵入式脑机接口技术; 非侵入式脑机接口技术; Neuralink; 强脑科技

中图分类号:R318;TN911.7

文献标志码:A

文章编号:1671-0479(2025)02-105-008

doi:10.7655/NYDXBSS250030

数据显示,我国当前有超过8 500万的残疾人,占全国人口总数6%以上,其中视力残疾、听力残疾和肢体残疾人数超过一半。如何通过先进的技术手段减轻甚至消除他们的痛苦,为其创造可能的改变和希望,是一项十分重要而又有意义的民生工程。李强总理在2025年的《政府工作报告》中指出,要“持续推进‘人工智能+’行动,将数字技术与制造优势、市场优势更好结合起来,支持大模型广泛应用,大力发展智能网联新能源汽车、人工智能手机和电脑、智能机器人等新一代智能终端以及智能制造装备”。脑机接口作为实现“碳基生命”与“硅基智能”有机融合的前沿技术,由于其在治疗脊髓损伤、肢体残疾、视障、耳聋、孤独症、帕金森综合征和抑郁症等方面具有显著优势,受到了国内外广泛关注,相关的研究成果和应用案例正在不断呈现。随着医疗人工智能的快速发展,脑机接口正迎来新的机遇和挑战。作为有着广阔应用前景和市场需求的发展领域,我国的科技界、产业界和医疗界需要精诚合作,尽力抢占医疗科技发展制高点,以避免高端医疗装备领域被“卡脖子”的情形再次发生,努力使中国成为全球脑科学创新策源地,在造福无数残障人士的同时,也为科技进步和经济增长创造更多的机会。

## 一、脑机接口概述

脑机接口并不是新生事物,从概念的提出到应用实践探索,已经历了半个多世纪的历程,随着人工智能技术多方面的突破,迎来了新的发展契机。

### (一)发展脉络

1924年7月6日,德国精神病学家汉斯·伯杰(Hans Berger)首次记录了人脑的能量活动,发表了历史上第一篇记载人类脑电测量的论文,公开了在人类头盖骨上测量到的电波图像,并将此图像命名为脑电波(electroencephalogram, EEG),由此开启了揭示脑电奥秘的历程。百余年来,人类对脑奥秘探索的脚步从未止步,脑机接口是其中重要的技术成果。

脑机接口的概念最初诞生于美国,加州大学洛杉矶分校的计算机科学家雅克·维达尔(Jacques J. Vidal)于1973年在*Annual Review of Biophysics*(《生物物理学年度评论》)上发表论文《Toward direct brain-computer communication(直达脑机接口)》<sup>[1]</sup>,创造性地提出了“brain-computer interface(BCI)”(中文为脑机接口)一词,由此开启了这一新兴领域的快速发展进程。五十多年后的今天,随着神经科学、计算机、集成电路、互联网、物联网、材料科学以

基金项目:江苏高校哲学社会科学研究重大项目“江苏数字经济高质量发展研究”(2021SJZDA018)

收稿日期:2025-02-16

作者简介:姚国章(1968—),男,浙江慈溪人,教授,研究方向为数字经济与人工智能应用,通信作者,yaogz@njupt.edu.cn。

及人工智能等多种学科的快速融合发展,脑机接口的概念也在不断演进。一般认为,脑机接口是指在生物脑与智能机器之间建立直接的数据传输和控制通道,实现双向交互的技术。具体而言,脑机接口技术既能够采集并解析脑活动数据,用于控制外部设备,同时也可以将人工编码的信息直接输入脑,以实现认知功能的替代、修复、增强或改善,并实现脑与智能机器的双向交互、协同工作及功能融合。

## (二)基本原理

作为一种具有颠覆性的人机交互模式,脑机接口摆脱了外周神经和脑部肌肉,直接在脑与智能设备之间建立起一种全新的通信与控制通道,既为传统的通过医学方式难以解决的脑部疾病提供了新的治疗手段,也为进一步拓展人类的智能提供了更多的可能性。而且,脑机接口的应用不仅仅局限于医疗领域,其在教育、军事、文化、娱乐等领域的应用,也带来了重要的创新变革机遇。

脑机接口的基本原理是:通过在不同脑区部署多种脑电传感器阵列以实时采集相应的电信号,对这些信号进行预处理、特征提取、模式识别和机器学习等程序后,解析出脑活动的特定思维或行为意图,并通过反馈通道将相关信息或控制指令反馈给脑,最终帮助用户调整行为模式,以达到更优的行为效果。具体流程见图1。

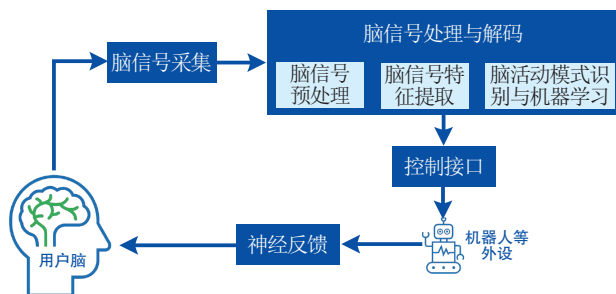


图1 脑机接口原理流程图

各组成部分的角色与作用如下。①用户脑:系统操控者,是脑机接口的主要信号源;②脑信号采集:采集高质量脑信号,并确保传感器安全、舒适、美观和易用;③脑信号处理和解码:包括脑信号预处理、脑信号特征值提取以及脑活动模式识别与机器学习三个环节;④控制接口:将用户意图所表征的逻辑控制信号转换为语义控制信号,再转为物理控制信号;⑤机器人等外设:包括康复机器人、智能假肢等;⑥神经反馈:用以实现双向脑机交互,促进脑电信号和电子信号互联互通。

## (三)发展目标

随着现代医学的不断进步,人类对大脑听觉、视觉、触觉、味觉、运动、语言等功能区的分布和具

体功能有了更加深入系统的认识。通过脑机接口设备获取特定关键信息,再进行分析与解读,在神经、精神、眼科、耳科等多个医学领域的诊断、筛查、监护、治疗与康复方面展现出广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。脑机接口的发展主要包括具有渐次递进的四重目标。

**第一重目标:修复身体功能。**通过脑机接口修复残障人士的生理缺陷,用机器替代人类身体的部分机能。如让瘫痪患者重新站起来行走,让视障人士重见光明等。这既是脑机接口发展的初衷,也是最能体现脑机接口应用价值的典型成果。

**第二重目标:改善精神状态。**通过脑机接口,改善大脑运行状态,让其保持强劲活力、思维敏捷,并能集中注意力,精神饱满地处理各种复杂事务。

**第三重目标:增强思维能力。**通过脑机接口实现短时间内拥有大量的知识和技能,以实现记忆移植等目标。这是治疗失忆症等疾病的有效方式,在美国已出现用记忆芯片给猴子移植记忆的例子,为在人体上的应用奠定了基础。

**第四重目标:重塑沟通模式。**通过脑机接口重塑人机交互沟通方式,同时也为利用脑电信号直接通信提供可能,让那些失去语言能力的残障人士实现无障碍沟通,同时也为破解动物的“思想”提供可能,实现人和动物之间的“心灵相通”。

## (四)技术体系和产业链构成

脑机接口的技术体系主要分为硬件层和软件层两大组成部分。硬件层包括脑电采集设备和脑电信号处理设备,其中脑电采集设备包括核心材料和器件、电极,脑电信号处理设备包括芯片、电源等;软件层包括脑电信号分析、核心算法、通信计算和隐私安全。硬件层和软件层有机统一,犹如电脑的硬件和软件,两者相互依存、融合共生。从技术发展的瓶颈来看,硬件层面临着数据存量越来越大、数据传输速度越来越快、数据精准度要求越来越高的压力;软件层则对算法的解析能力、数据编码方式以及安全与隐私保护方面有了更高的适应需求。从产业链的角度来看,脑机接口包括上中下三个组成部分:上游是脑机接口的脑信号采集设备,分别包括脑机接口电极、脑机接口芯片、脑机接口组件三大类型的硬件产品;中游主要是用来实现脑电信号采集、处理和分析的各类通信系统及软硬件设施;下游主要包括应用端的各类外设、软件以及支撑运营的平台。

## (五)脑机接口的类型

根据脑信号采集时电极植入脑位置的深浅,脑机接口分为侵入式、半侵入式和非侵入式三类。

侵入式脑机接口指通过神经外科手术将电极等信号记录装置植入脑内特定部位,实现精准定位

的高通量神经信号采集的技术。这种接口模式必须通过开颅手术将电极植入脑皮层,只有这样才能直接采集更加稳定和可靠的脑电信号。这种方式进一步可分成皮层电极和深度电极,前者需要将电极植入脑皮层,获得更高的脑电信号和更为精确的脑活动数据,但需要精细的手术,必然会使风险大大上升;后者是将电极植入脑内部,采集深层神经元信号,通过刺激脑的特定核团来改善某些神经系统疾病症状。深度电极既能获得更高质量的脑电数据,又能对脑活动进行精准干预,在某些疾病治疗方面具有独特的效果,但由于植入位置和深度的把控难度较大,继发性感染的可能性就会上升。如果出现颅内感染、电极故障或电极寿命耗尽等情况,就必须将电极取出,必然需要二次开颅,危险性大大提高,手术的难度也会进一步加大。

半侵入式是指将脑机接口植入颅腔内,脑皮层之外,不直接接触神经元细胞。这种模式通常需要将电极植入头皮下、贴合硬脑膜但不需要直接穿透脑皮层,目前较为典型的应用是脑皮层电图,通常用于癫痫病灶的定位和手术指导。这种方式的优点在于信号质量高,手术风险相对较小;缺点在于需要开颅手术,对患者有一定的损伤,费用也较高。

非侵入式脑机接口是指通过附着在头皮上的感知穿戴设备来记录脑信息并进行解读的技术。这种模式无需将电极植入脑内部,只需要将穿戴设备,如脑电帽、近红外头盔或磁共振头线圈等附着在头皮上,即可获得所对应的脑电数据。目前已广泛应用的脑电波检测就属于这一类型,这种不破皮的检测方式安全性高,操作简单,医生和患者的接受度高。非侵入式脑机接口系统的脑信号采集方法除了在头皮直接采集外,还可采用近红外光谱、经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)等。

作者根据相关素材绘制了三种类型的脑机接口分别对应脑的不同位置,如图2所示。根据我国《医疗器械分类目录》的规定,脑机接口相关设备的分类主要为Ⅱ类和Ⅲ类,Ⅲ类的注册难度和监管要求等显著高于Ⅱ类,所以我国的相关企业基本都选择非侵入式脑机接口技术路线,半侵入式和侵入式的还处在前期探索阶段。

## 二、脑机接口发展面临的挑战

脑机接口经历了较长期的发展取得了喜人的进展,在医学等领域发挥越来越重要的作用,但所面临的挑战仍然十分复杂<sup>[3-4]</sup>。人类思维活动的物质基础是神经活动,而神经活动所表现出来的脑电波信号极为微弱,电压低到只有正负50微伏,相当于一节五号电池的百万分之一,要精准获得脑电信号就如同检测50公里以外一只蚊子煽动翅膀的声

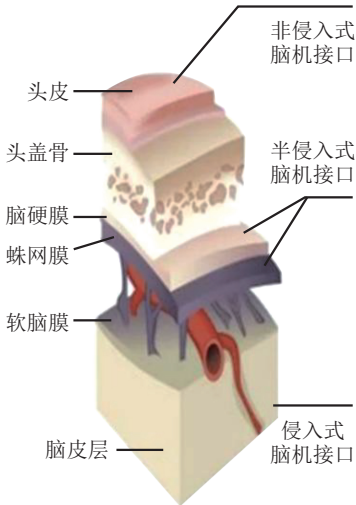


图2 不同类型脑机接口与脑位置对应关系

音<sup>[5]</sup>,研发先进传感器去精准辨别混在浩瀚噪音里的信号,具有极高的挑战性。此外,目前对于脑科学的认知还存在局限,人类脑拥有约860亿个神经元,而现有的脑机接口最多只能植入脑数千个电极,两者之间的差距巨大,要以当下的技术条件实现全脑解析还任重道远。

### (一)信号解析瓶颈

脑电信号与行为意图的映射关系极为复杂,如何对脑电信号进行精准翻译存在诸多困难。脑电信号的获取虽变得越来越方便,但如何破译其中的行为意向,比如如何判别想喝水还是想进食,希望站立起身还是希望有人陪伴等。比不同国家之间语言差异更难把握的是脑电信号与行为意向之间的差异,这是脑机接口首先必须面对的现实考验。

### (二)碳硅融合风险

植入式电极易引发排异反应,长期生物相容性亟待验证,如何实现“碳基生命”和“硅基智能”的有机融合是极大挑战。植入式脑机接口需要将电极深入脑深部,既可能产生严重的排异反应,也可能因为传输不畅导致信号中断。因此,如何实现“碳硅共生”是一个必须切实面对的现实问题。

### (三)成本与可及性

高端脑机接口设备成本高昂,医疗资源分布不均制约了其普及,如何降低使用成本和应用风险还存在诸多障碍。脑机接口虽然在治疗帕金森综合征、视障、耳聋等重大疾病方面提供了更多可能性,但存在治疗成本过高、有资质和能力进行治疗的医疗机构和医生匮乏、实施风险大等问题,亟待找到有效的解决措施。

### (四)数据安全和用户隐私保护风险

当越来越多的人脑与智能设备建立起各种连接,数据的传输、存储和分析处理必将面临新的挑



战,如代表张三创意的数据文件被他人窃取,李四个人情感记忆数据被他人公开等,诸如此类的问题会不断呈现,如何确保数据的安全并能有效保护用户隐私等问题,将成为新的挑战。

#### (五)伦理和法律等面临冲击

从脑机接口远期展望来看,人类实现“数字化永生”将成为可能。如一位因衰老或疾病即将离世的人在生前通过脑机接口采集脑电数据,经过分析处理后导入智能机器人,使原主人的思想和智慧通过人工智能技术得以传承。更进一步地,将原主人的脑电数据导入另一位愿意接收的健康人脑中,这样很有可能产生诸如“你是谁”“你从哪里来”等伦理问题,对现实的法律体系也会带来多方面的冲击。

#### (六)材料与制造工艺等方面存在短板

脑机接口技术从实际应用的角度来看,面临着材料和制造工艺等方面的制约。从材料角度看,脑机接口必须兼顾生物兼容性和存在形态的稳定性,相应的材料研发滞后于应用发展的需要,而且由于规模尚未形成,成本居高不下的情形会在较长时间内存在。从制造工艺来看,脑机接口各组件之间的融合性以及各独立部件的精密性,都给生产制造带来极大的挑战。

### 三、脑机接口实践案例

#### (一)Neuralink

Neuralink(中文名为“神经链接”)是世界著名的侵入式脑机接口技术领导者,以“创建一个通用的脑机接口,为那些今天尚未满足医疗需求的人恢复自主权,并释放人类明天的潜力”为使命,经过多年的探索,为侵入式脑机接口解决人类疑难脑部疾病方面带来了新的曙光。

##### 1. 发展过程

Neuralink创立于2015年,2016年被全球科技界的领军人物埃隆·马斯克(Elon Musk)收购,公司位于美国加利福尼亚州旧金山郊区的弗里蒙特,研究对象为侵入式脑机接口技术。马斯克在之前的一次旅行中用拇指在手机上输入文字,感觉特别费时费力,希望有更高效、更准确、更便捷的人机交互方式,这是他研发侵入式脑机接口的初衷。他设想在人的头骨内放置芯片,将脑信号发送给计算机并接收信号回传,以期让信息交互速度有革命性提升。

2020年,Neuralink将型号为Link V0.9、直径为23毫米的电极芯片植入猪脑,首次实现了神经信号的读取及写入,开创了与动物脑交互信息的先河。2021年5月,Neuralink发布了一只名为Pager的猴子在植入大脑芯片后通过意念玩游戏的视频,引起了世界范围内的轰动,标志着动物智能被“升级”的可

能。2023年5月,Neuralink获美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)批准进行临床研究。2023年9月,Neuralink宣布招募受试对象,标志着人体临床试验开始启动。2024年1月,Neuralink正式进行人体测试,首次就成功地将芯片植入一位名叫诺兰(Noland)的患者脑部。2024年9月,大脑植入芯片Blindsight获得FDA“突破性设备”认定。2024年11月,Neuralink获准在加拿大开展脑机接口试验,首次在该国招募6名愿意在脑中植入1000个电极触点的瘫痪患者。Neuralink当前虽仍处在实验探索阶段,但由于能帮助特定病患解决重大问题,得到了越来越多国家和医疗机构的认同,测试规模正在不断扩大,应用效果也在稳步提升。

##### 2. 工作原理

Neuralink脑机接口设备“N1”的植入体大小如硬币,由微处理器、蓝牙发射器、可充电电池以及包含1024个电极的超细导线构成。这些导线非常柔软,能最大限度减少植入过程中的损伤。为了确保精确植入,Neuralink专门设计了手术机器人。植入后,电极检测神经信号并将其转换为数字指令,通过蓝牙传输到外部设备。当脑部进行思考想要移动光标时,运动皮层的相应神经元会被激活,从而实现屏幕上精确的光标移动。

##### 3. 发展目标

Neuralink的目标是通过提升人类与人工智能的协同能力,解决人类所面临的重大疾病挑战,不仅能帮助治疗神经疾病,还将在增强人类认知能力和实现人机共生方面发挥关键作用。其所希望达到的发展愿景包括以下六个方面:一是视觉恢复,可以实现植入电极与视觉皮层交互,从而恢复基本的光和形状感知;二是扩展到听觉皮层应用,以恢复语言能力,并在语言学习方面有所超越;三是替代智能手机,超越传统智能手机等设备,成为人机交互的高带宽接口,显著提升文字、语音交互的效率;四是增强人类能力,为用户增强认知、记忆和生产力,改变传统的学习和记忆等方式;五是将整个手术所有费用控制在5000美元左右,为所需要的患者提供可承受的费用;六是可实现持续升级,采用可替换的植入设备,确保技术的持续升级和普及。

##### 4. 实践进展

Neuralink已经完成三位患者的测试,均取得了良好的效果。

第一位测试者:诺兰(Noland)。诺兰2016年在湖里游泳时脊髓受伤导致瘫痪而失去四肢功能,此后生活一直无法自理,为此深感痛苦。他被选中试验后,植入了Neuralink公司的首款产品Telepathy

(中文名为“心灵感应”)。工作人员将一个类似于纽扣电池的小型装置植入他的大脑中负责处理运动系统指令的区域,从该区域延伸出带有电极的微型导线,用于接收来自其大脑的信号,大脑命令通过无线方式传输到计算机上的应用程序,因此,植入者可以用专门的程序来控制。植入手术完成后,诺兰能够通过脑电信号控制电脑上的光标,甚至可以玩电子游戏,如马里奥赛车,术后效果十分显著。他为工作人员提供了非常积极的反馈:“Neuralink 帮助我重新连接了世界、朋友和家人。我可以再次独立做事,无需家人随时随地帮助。……可以让我按照自己的节奏生活。”毫无疑问,Neuralink 不仅给诺兰带来了生活的便利,同时也给他创造了更多的希望和可能。

第二位测试者:亚历克斯(Alex)。亚历克斯因脊髓受伤而四肢瘫痪,全身丧失活动能力。他曾是一名汽车技术员,负责修理和修补各类车辆和大型机械,他一直想学习如何使用CAD软件来设计3D对象。在植入脑机接口电极后仅5分钟,亚历克斯就能用意念控制光标,能同时移动和瞄准玩电子游戏CS2。在第二天,亚历克斯直接用CAD软件Fusion 360,成功地为自己设计了一个3D打印的充电器支架。令人惊喜的是,脑机接口不仅让亚历克斯获得了自由和独立,同时还让他圆上了3D设计梦。

第三位测试者:布拉德(Brad)。布拉德因患颈脊髓损伤和肌萎缩侧索硬化症(amyotrophic lateral sclerosis, ALS, 也称渐冻症)晚期而四肢瘫痪,既无法说话,也无法随意移动除眼睛和嘴角以外的任何身体部位,只能依靠唯一的交流方式——眼动仪打字与外界交流。不幸的是,眼动仪容易受到眼球位置细微变化的影响,在光线充足的环境中不能使用,导致他在户外或光线明亮的室内环境中无法交流。因此,布拉德只能待在拉上窗帘的黑暗室内。植入脑机接口电极后,布拉德可以在各种环境中通过电脑屏幕和键盘打字与人进行交流,如在公园与邻居聊天,在当地教堂与年轻人进行现场问答等等。

## 5. 研发新进展

Blindsight(中文名为“盲视”)是Neuralink推出的第二款产品,旨在让那些失去双眼或视神经受损的人恢复视力,在2024年9月获得了美国FDA“突破性设备”称号。它与已有的视网膜植入物不同,视网膜植入物只能将信号从摄像头发送到进入视网膜神经的电极,而无法到达大脑,所以对先天失明的人不起作用,而Blindsight是一种脑植入物,它直接进入大脑的视觉皮层区域。其原理是通过一个外接设备,将外界的光信号转为电信号,绕过人类视觉系统前端,直接无线导入大脑,而大脑中提前植入的电极在收到信号后,会刺激视觉皮层神经

细胞并产生图像。理论上,这将真正实现人类“不需要眼睛,也能看见世界”。

Blindsight 植入技术已经在猴子身上发挥作用,一旦在人脑应用开发成功,不仅会给无数的视障人士带来翘首以盼的光明,同时也将大大延伸人类观察和感知世界的能力。

## 6. 优缺点分析

Neuralink 在侵入式脑机接口取得的成果令人鼓舞,从最新的进展来看,其优缺点也非常明显。其优点主要表现在以下方面:一是直接破译脑密码,从根本上打通“碳基生命”和“硅基智能”的通路,将会开辟人类探索智慧奥秘的新纪元;二是为修复脑和治疗特殊疾病提供了新的可能,为相应的药物开发以及手术治疗提供了新路径;三是马斯克的独特影响力会使这一技术加快落地,加拿大等国支持其开展人体实验为其拓展国际空间创造了良好条件。

其缺点主要表现在以下方面:一是技术的复杂性还需要经历艰苦卓绝的探索,不可能在短时间内有大的突破;二是高昂的成本将会在较长时间内影响其应用和推广,众多有需求的患者不得不为之望洋兴叹;三是个性化定制解决方案会成为其规模化应用的“拦路虎”,需要在发展过程中逐步找到兼顾通用性和专用性的方案,促进其更高效地发展。

## 7. 发展评述

Neuralink 是侵入式脑机接口的领跑者,在马斯克的带领下在极具挑战的领域开疆拓土,经过多年的努力已取得令人鼓舞的进展,带给我们多方面的启示。一是侵入式脑机接口有较为广阔的前景。侵入式脑机接口充满着诸多未知,加上相关的法律法规有较多的限制,要在短时间取得突破难度极大,但一旦在人脑和智能机器设备之间建立起高效的信息传输机制,将会带来巨大的商机,同时也会形成新兴的产业形态。二是侵入式脑机接口将会为治疗相关重要疾病提供契机。传统的治疗方法对抑郁、焦虑、阿尔茨海默病等疾病束手无策,侵入式脑机接口能直击病灶源头,为提供更有效的治疗方法闯出了一片新天地。我国有数量众多的病患群体,需要加强研究,提前布局,造福更多病患。三是抢抓高端医疗器械发展机遇。我国在高端医疗器械领域长期处于相对滞后的状态,侵入式脑机接口具备将来成为高端医疗器械的潜质。我国既具有十分可观的市场需求,又有不断进步的医疗器械研发和制造体系,需要从长计议,稳扎稳打,有序推进。

## (二)强脑科技

强脑科技(英文名为“BrainCo”)是脑机接口的后起之秀,创立于2015年,由首家入选哈佛大学创



新实验室(Harvard Innovation Lab)的中国团队全力打造,致力于成为非侵入式脑机接口技术解决方案供应商的全球领跑者。经过整十年的快速发展,已在大健康、康复、人机交互等领域具有领先优势。浙江强脑科技有限公司成立于2018年12月,法定代表人韩璧丞为哈佛大学博士,总部位于杭州市余杭区,致力于发展非侵入式脑机接口技术,为残疾人康复、孤独症等脑部疾病提供解决方案,已成为非侵入式脑机接口领域首家独角兽企业,为满足特殊人群的迫切需求带来了福音。扎根中国以后的强脑科技以技术为核心,以科研为导向,拥有领先的科学家团队,其中2/3以上来自哈佛大学、麻省理工学院等全球顶尖学府,脑机接口领域的学术奠基人米格尔·尼科莱利斯(Miguel Nicolelis)担任强脑科技首席科学顾问。企业的使命是致力于为正在遭受脑疾病的人群提供以脑机接口为底层技术的解决方案,并将技术集中应用在医疗健康领域。

### 1. 发展历程

强脑科技在过去十年的发展历程中,经历了一系列重要的时间节点。2015年在哈佛大学成立,同年荣获哈佛中国论坛创业大赛第一名。2016年强脑科技在国际消费类电子产品展览会完成首秀,收获USA Today Inc等知名媒体的好评。2017年强脑科技攻克了脑电信号难以大规模精准采集的难点,实现底层技术突破,同时实现新式电极材料固体凝胶电极的批量化生产。2018年在非实验条件下帮助上臂残疾患者借助BrainCo智能仿生手使用脑控义肢与世界著名钢琴家同台演奏钢琴。2019年BrainCo智能仿生手荣获美国《时代》周刊年度百大最佳发明奖,并登上封面,获评“开创了脑机接口领域的先河”。2022年强脑科技攻克消费级脑机接口设备各类工程和技术难题,实现高精度单品10万台量产,产业化初具规模。2024年强脑科技被认定为国家级专精特新“小巨人”企业,同时成为众所周知的“杭州六小龙”之一。

### 2. 智能仿生手

世界卫生组织的数据显示,神经系统疾病对全球超过1/3的人造成影响,是致病、致残的主要原因,脑和神经系统相关疾病的治疗费用占比超过了30%的医疗开支;自1990年以来,由神经系统疾病引起的残疾、疾病和过早死亡(残疾调整生命年)的总数增加了18%。为改变这一现状,强脑科技在此领域开展深入研究,希望以脑机接口+人工智能技术解决肢体残疾人士、孤独症儿童等群体面临的实际问题。其中,BrainCo智能仿生手是其代表性的产品,已在国内外产生十分重要的影响。

2015年,强脑科技采用一套全新的、名为“基于机器学习归类下的人类学习”的自学习理论,成功

研发出当时市场上精度最高、加密性最好的可穿戴脑电芯片,以及可以如意操控的机械手,这是其智能仿生手的雏形。经过数年的迭代开发,BrainCo智能仿生手已成为一款充分融合人工智能算法的脑机接口智能产品,可通过检测佩戴者的神经电和肌肉电信号,精确识别佩戴者的运动意图,并将运动意图转化为智能仿生手的动作,从而做到灵巧智能,手随脑动,既可实现5根手指的独立运动和手指间的协同操作,又能满足上肢截肢患者日常生活使用所需要的常用手势,像控制自己的手一样灵活地控制假手动作<sup>[6]</sup>。2022年,BrainCo智能仿生手亮相北京2022年冬残奥会,助力残疾人运动员完成圣火传递,同年获美国FDA认证。2023年,残疾人运动员使用BrainCo智能仿生手点燃杭州第4届亚残运会主火炬。图3为用BrainCo智能仿生手弹奏钢琴实例。



图3 BrainCo智能仿生手弹奏钢琴实例(来源:强脑科技)

在受益人群中,倪敏成是其中非常特殊的一位。倪敏成9岁那年因一次意外事故严重受伤,失去了双手。幸运的是他作为第一个用户安装了智能仿生手,并提供了自己的生物信息、肌肉信息、神经信号等对数据模型进行训练,现在他已实现仿生手5根手指的独立运动和手指间的协同操作控制,既能做到生活自理,还能写一手好书法。

### 3. 智能仿生腿

智能仿生腿是融合脑机接口技术和人工智能算法的新型智能下肢,在佩戴者行走时可根据环境与行走的情况进行实时步态调整,实现高仿生体验。BrainCo轻凌M3智能仿生腿是强脑科技在脑机接口领域开发的一款具有智能算法技术与控制的新型智能膝关节假肢。它可以通过传感器系统进行数据实时采集获取,经过算法处理后转化为指令控制产品的液压系统,从而做到针对当前运动状况进行动态地实时适配,满足下肢截肢患者在日常生活活动场景中所需要的动作自由度,用户可以像控制自己的腿一样控制假肢舒适、安全、自由地行走。图4为轻凌M3智能仿生腿应用实例。



图4 轻凌 M3 智能仿生腿应用实例(来源:强脑科技)

轻凌 M3 智能仿生腿通过人工智能算法处理神经信号并结合内置传感器识别用户从而适应不同环境下佩戴者的步态,并动态调整膝关节对称状态,特别是在下坡、下楼梯的时候,用户可以放心地把重心放在假肢侧而不会失去支撑,无论是过马路还是赶公交,用户均可如健全人般自由调整步速,轻松实现从慢走到小跑的随心切换。同时利用算法智能检测异常情况,在突发场景下可主动急停,提供更安全、稳定的支撑,通过轻凌 APP 等方式,用户可以轻松地进行假肢的调整和管理,相较于传统的膝关节假肢更稳定、安全、省力、便捷。

#### 4. 优缺点分析

强脑科技作为引领中国乃至世界非侵入式脑机接口发展的企业,所研发的产品和技术方案也存在一定的优缺点。优点主要表现在以下方面:一是非侵入式脑机接口无须在脑内部植入电极芯片,对患者脑不产生实质性损伤,对提升肢体残疾人士的生活能力和生活质量有巨大的帮助,更容易获得患者的认同和支持;二是不需要进行开颅手术,大大降低了手术风险,同时也有效降低了应用门槛;三是基于非侵入式脑机接口技术所开发的智能仿生手、智能仿生腿等以远低于同类产品的价格和更好的应用便利性占领市场,极具市场竞争力,有广阔的发展前景。

缺点主要表现在:一是非侵入式脑机接口的脑电信号过于微弱,高效传输和精准解析难度极高,尚需要攻克诸多技术瓶颈;二是非侵入式脑机接口的产业链尚未成熟,包括高精度电极、数据传输和分析系统等配套保障需要较长时间的培育才能形成气候;三是使用者的配合以及长期的训练对应用效果关系重大,对一些身体局限、训练基础薄弱的用户,存在比较大的困难,影响其作用的发挥。

#### 5. 发展评述

作为“杭州六小龙”之一的强脑科技凭借世界

领先的技术优势,在脑机接口的广阔舞台大展拳脚,以“科技造福人类”为使命,开发出了一系列既能解决用户痛点又具有广阔市场前景的脑机接口产品,成为非侵入式脑机接口领域的领跑者。带给我们的主要启示有以下三个方面。

一是抢占非侵入式脑机接口技术制高点。从全球范围来看,患有四肢伤残、抑郁、焦虑和痴呆等相关疾病的用户数以十亿计,在传统的治疗方法遭遇瓶颈甚至无解的背景下,非侵入式脑机接口技术有着无可比拟的优势,具有十分广阔的发展前景,需要加大研发力度,加快发展步伐,尽力抢占国际发展制高点。

二是不断提升自身发展优势。强脑科技迁入中国后,在技术上不断取得突破,同时充分发挥中国制造业供应链高效率、低成本的优势,使智能仿生手的价格降到了进口产品的 1/5 以下,价格优势得到进一步凸显,既让更多的残疾人及早受益,又使得发展的“护城河”得到不断稳固。

三是加强与用户的深度协同至关重要。脑机接口探索的是极为神秘的脑奥秘,要解决的是特殊群体的特定需求,只有用户的深度参与才能使技术更好地解决用户的痛点,产生更好的效果。强脑科技建立起一支以倪敏成为代表的产品体验官队伍,使研发的需求更为明确,跟新用户的交流更为顺畅,产品应用成效的体现更为可信,发挥出非同寻常的作用。

## 四、结 语

随着深度学习、大模型等人工智能前沿技术的突破,脑机接口正迎来新的发展机遇,在巨大的市场需求牵引下,正处于爆发式增长的前期。当前围绕脑机接口前沿技术研发和应用的竞争已经拉开帷幕,美国在侵入式脑机接口方面具有领先优势,中国在非侵入式脑机接口方面已具备良好的发展基础,中美两国在这一领域处于领先地位,未来两国之间的竞争必将会越来越激烈。

毋庸置疑,脑机接口是治疗多种疑难病症首选的技术,我国应抢抓机遇,大力推进,包括加大政府支持力度、引导金融资本注入、促进政产学研用多方合作、重视高层次人才培养、培育产业发展生态、加强知识产权保护等,力争在较短时间内形成产业规模、提高国际影响力,在造福众多用户群体的同时,创造出更多、更大的经济价值和社会价值。

道阻且长,行则将至。我国脑机接口发展虽然还存在着诸多困难和挑战,但只要立足科技前沿,瞄准人类医疗健康的核心需求,整合各方力量大刀阔斧地推进,就一定能形成富有强盛生命力和巨大影响力的脑机接口发展生态,从而推动脑机接口的

科学研究、技术研发、市场培育和人才培养全面开  
创新局面。

作者声明

本文不是基于商业的目的,无潜在的利益冲突。

参考文献

[1] VIDAL J J. Toward direct brain-computer communication  
[J]. Annual Review of Biophysics, 1973(2): 157-180  
[2] 李喆. 意识连接世界——物联网入口之脑机接口[J].

通信企业管理, 2021(9): 64-68

[3] 张渺. “脑机接口”频频上新离日常生活还有多远[N].  
中国青年报, 2024-07-05(3)  
[4] 屠晨昕, 何冬健. 脑机接口, 会是人类继续进化的开关  
吗?[N]. 浙江日报, 2024-10-18(8)  
[5] 陈敏. “脑机接口”大开脑洞[N]. 每日商报, 2024-06-  
10(A08)  
[6] 晏澜菲. 数智化产品擦亮高质量发展底色[N]. 国际商  
报, 2024-04-18(3)

(本文编辑:接雅俐)

Research progress and typical case studies of brain-computer interface

YAO Guozhang<sup>1,2</sup>

1. School of Management, 2. Institute of Digital Economy, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing  
210003, China

**Abstract:** As a cutting-edge technology integrating biological brains with intelligent machines, brain-computer interface (BCI) is reshaping the technological paradigm of neurological disease diagnosis and treatment, as well as human capability enhancement. By deconstructing the technological development graph of BCI, this paper systematically compared the performance characteristics of invasive and non-invasive technologies, analyzed the multiple challenges faced by current technological development, and revealed the technological evolution patterns by drawing on practical cases such as Neuralink's implantable chips and BrainCo's non-invasive brainwave headband. It is necessary to promote clinical translation and large-scale application of BCI technology actively, foster a supportive industrial ecosystem, and establish itself as a global innovation hub in brain science.

**Key words:** brain-computer interface; invasive BCI technology; non-invasive BCI technology; Neuralink; BrainCo