



中国科学院院士赵继宗： 脑机接口的百年探索与中国实践

伴随脑科学研究的不断深耕,脑机接口在医疗健康领域的应用前景十分广阔。目前,脑机接口正处在从早期临床试验向规范化临床应用过渡的关键跨越期,尽管仍有诸多技术、伦理及长期可靠性问题亟待解决,但已取得里程碑式突破。

政策长期赋能之下,近年来,中国脑机接口发展提速,技术应用进入“快车道”。北京、天津、广州、武汉、南京等多地医疗机构纷纷设立脑机接口门诊或临床研究病房。2026年,国家药监局批准国产微创侵入式脑机接口医疗器械上市,这是全球首款取得商业化上市注册证的微创脑机医疗设备。

脑机接口的百年历史

脑机接口(brain-computer interface, BCI),是指在人或动物脑与外部设备间创建的直接连接通路。

脑机接口发展至今,跨越了100多年,经过了三个阶段。

1924年到20世纪70年代,属于学术探索的阶段。20世纪70年代到20世纪末,是科学论证的阶段。进入21世纪,脑机接口发展迅速,进入了应用实践的阶段。

1924年,德国精神科医生汉斯·贝格(Hans Berger)首次记录到人脑 α 波。 α 波频率为8-13赫兹,人在闭眼放松、保持清醒时会清晰出现,一旦进入睡眠, α 波便会大幅衰减、基本消失,这也是判断人体进入睡眠状态的核心依据。时至今日,脑电波仍是脑机接口最主流、应用最广泛的信号来源,1924年人类首次

捕获脑电波的科学突破,也成为脑机接口技术发展的科学起点。

1969年,美国华盛顿大学医学院神经科学家埃伯哈德·费兹(Eberhard Erich Fetz)将猴大脑神经元连接到仪表盘,设计游戏让猴通过特定思考,触发仪表盘的指针转动,完成了首个实现大脑直接操控外部设备的原型实验。

1973年,美国加州大学洛杉矶分校计算机专家雅克·维达尔(Jacques J. Vidal)发表里程碑论文,首次提出并定名“BCI(脑机接口)”,搭建起该领域核心概念框架。

1978年,人工视觉领域先驱威廉·多贝尔(William Dobelle)为失明患者杰瑞(Jerry)完成手术,在其大脑视觉皮层植入68通道铂电极阵列。这套被称为“多贝尔眼”的系统由特制眼镜、便携计算机构成。眼镜搭载微型摄像头与测距传感器,采集画面后传输至腰间计算机完成图像处理,再转化电脉冲刺激大脑皮层,让杰瑞感知到虚幻视点阵,以此勾勒物体轮廓。该实验开创了借助脑机技术重建受损感官、突破生理障碍的研究方向。

1998年,埃默里大学菲利普·肯尼迪(Philip Kennedy)完成脑部植入手术,依靠自研神经营养电极连接人脑与计算机,帮助一名闭锁综合征患者实现意念操控电脑光标。同年,布朗大学约翰·多诺霍(John Donoghue)团队启动BrainGate脑机接口前置研发;2004年,BrainGate为一名四肢瘫痪患者植入高密度电极阵列,患者依靠意念控制机械臂完成抓取、操控电脑光标,标志高密度侵入式脑机接口迈入功能性人体临床试验阶段。

2005年,BrainGate为一名瘫痪患者植入皮层电极,患者术后超千天仍可依靠脑电信号稳定操控电脑光标;

2012年,升级后的BrainGate2系统实现意念操控机械手抓取咖啡、送至嘴边后放回桌面。

2016年,白宫前沿会议上,一名车祸致四肢瘫痪患者,依托匹兹堡大学搭载犹他电极阵列的双向触觉反馈意念机械臂,与奥巴马完成碰拳互动,这场面向公众的实操展示,成为全球双向感官闭环脑机交互的标志性案例。

脑机接口技术飞速发展,落地应用持续拓宽。当前全球高校与科研机构的脑机接口相关研究涵盖五大核心赛道:三类脑信号采集方案(侵入式微电极阵列、非侵入式脑电采集、皮层柔性电极阵列)、无创神经调控干预技术,以及作为底层支撑的类脑芯片与神经形态计算。

2019年,Neuralink公司公布脑机接口原型(N1系统)重大突破:系统搭载96根直径4~6微米柔性线程,合计3072个电极;该实验室样机通过外置USB-C接口传输、读取脑电信号。

2021年,科技创新2030“脑科学与类脑研究”重大项目(中国脑计划)正式落地,全面推动国内脑机接口产业创新发展。项目包含五大研究板块:脑认知原理解析、认知障碍相关重大脑疾病发病机理与干预技术、类脑计算与脑机智能技术及应用、儿童青少年脑智发育、技术平台建设。

同一时期海外也迎来关键技术突破:美国斯坦福大学克里希纳·谢诺伊(Krishna Shenoy)团队研发出意念手写字母侵入式脑机系统,受试者输入速度可达90字符/分钟,接近普通人群手机打字水平。

有望消除超30亿患者困扰

脑机接口落地场景十分丰富,主要覆盖五大应用领域:临床医疗、教育

培训、军事航天、VR游戏娱乐、智能机器人。

其中,临床医疗是脑机接口最核心、需求最迫切的落地赛道。而神经系统疾病构成了该领域最主要的应用需求。

神经系统疾病覆盖全生命周期,各年龄段高发病症各有不同:0~4岁以早产脑病、脑膜炎、神经管畸形为主;5~19岁多见癫痫、偏头痛、自闭症谱系障碍;中青年群体高发卒中、糖尿病神经病变;老年阶段则集中出现卒中、阿尔茨海默病等疾病。

2025年世界卫生组织(WHO)发布《神经病学全球状况报告》指出,全球超30亿人受神经系统疾病困扰,每年因此造成超1100万人死亡;报告梳理出十大高发神经系统疾病,涵盖中风、阿尔茨海默病及其他痴呆症、特发性癫痫、自闭症谱系障碍等。

脑卒中为全球第二大死亡、第三大致死病因,每年新增1200万病例;53%发病于70岁以下,89%发生在中低收入国家,是我国居民首位致死疾病,发病后近七成至八成患者留下偏瘫、失语、认知衰退等后遗症;我国阿尔茨海默病(AD)患者超980万,未来将成为全球AD病患第一大国,现阶段无根治药物,仅可延缓病情;国内65岁以上人群帕金森病患病率1.7%,患者超500万,占全球近四成;渐冻症(ALS)属罕见进展性神经疾病,40~50岁高发,全国患者约10万,晚期全身瘫痪需呼吸机支持,目前尚无根治方案。

依据全国残疾人抽样调查数据,我国残疾人约8500万,肢体、听力、视力残疾人数居前三,大量残障由脑疾病引发,现有干预康复手段覆盖不足。

面对庞大的神经系统疾病患者群体,脑机接口被寄予厚望。(下转第5版)