

DOI: 10.13376/j.cblls/2025007

文章编号: 1004-0374(2025)01-0057-10



阮梅花, 中国科学院上海营养与健康研究所生命科学信息中心研究员, 主持上海市科委软科学项目“上海脑科学技术预见研究”等4个项目, 参与国家科技部、国家自然科学基金委员会、中国科协、中国科学院等来源项目20多项, 近年来重点围绕脑科学与类脑智能、慢病防控与健康促进、RNA研究与健康领域开展战略情报研究, 为国家和地区相关科技发展和政策管理提供决策参考。



张旭, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士, 中国医学科学院学部委员。广东省智能科学与技术研究院院长、研究员。兼任上海脑-智工程中心主任、中国神经科学学会理事长。长期从事神经系统疾病的分子细胞生物学机理研究。

脑机接口领域发展态势

阮梅花¹, 张丽雯¹, 张学博¹, 朱成姝¹, 刘 晓¹, 范月蕾¹, 熊 燕¹, 张 旭^{2*}

(1 中国科学院上海生命科学信息中心, 中国科学院上海营养与健康研究所, 上海 200031; 2 广东省智能科学与技术研究院, 珠海 519031)

摘 要: 脑机接口为人脑功能研究提供了重要方法, 为脑疾病临床诊治提供前沿探索工具。2024 年脑机接口领域进入技术爆发期, 具体表现在以下几方面。(1) 国内外加强脑机接口资助: 相比较而言, 美国重视电极、芯片开发及其在医疗与防务的应用, 欧盟重视相关材料开发与科研应用, 我国将脑机接口作为未来产业进行全面部署; (2) 相关技术迭代升级: 新型接口、电极等硬件被相继开发出来, 大模型应用于脑电解码中, 提升编解码能力; (3) 临床试验持续推进: 多款侵入式脑机接口进入临床试验, 目前全球已开展 70 多例临床试验; (4) 应用领域“多点开花”: 医疗应用从运动与语言修复、肌萎缩侧索硬化等罕见病的治疗, 扩展到抑郁症等常见神经精神疾病, 非侵入式脑机接口已经应用于疲劳驾驶检测、游戏娱乐等生产生活中; (5) 产业快速发展: 产值增长迅速, 企业研发活跃。未来, 脑机接口成本将大幅下降, 实现大脑与机器的双向交互, 为医疗、教育与娱乐等众多领域带来变革。

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-02-04

基金项目: 中国科学技术协会“2024年脑机接口交叉学科发展研究”; 上海市科委软科学项目(24692117100)

*通信作者: E-mail: xu.zhang@gdiist.cn

关键词：脑机接口；神经接口；编解码；脑机交互

中图分类号：Q42；R319；TN911.7 文献标志码：A

Progress in brain computer interface

RUAN Mei-Hua¹, ZHANG Li-Wen¹, ZHANG Xue-Bo¹, ZHU Cheng-Shu¹,
LIU Xiao¹, FAN Yue-Lei¹, XIONG Yan¹, ZHANG Xu^{2*}

(1 Shanghai Information Center for Life Sciences, Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China; 2 Guangdong Institute of Intelligence Science and Technology, Zhuhai 519031, China)

Abstract: Brain-computer interfaces (BCIs) provide cutting-edge tools for exploration of brain functions and treatments of brain diseases. In 2024, the BCI field entered a period of technological explosion, which is specifically manifested in the following aspects. (1) Strengthened funding both domestically and internationally. In comparison, the United States focuses on the development of electrodes and chips, as well as their applications in healthcare and defense; the European Union emphasizes the development of related materials and applications in scientific research; and China has made comprehensive deployments of BCIs as a future industry. (2) Iterative upgrades of related technologies. New types of interfaces, electrodes, and other hardware have been successively developed, and large models have been applied to brain signal decoding, enhancing the encoding and decoding capabilities. (3) Continuous advancement of clinical trials. Multiple invasive BCIs have entered clinical trials, and currently, more than 70 clinical trials have been conducted worldwide. (4) A wide range of emerging application fields. The medical applications have expanded from the rehabilitation of movement and language, and the treatment of rare diseases such as the amyotrophic lateral sclerosis, to the common neurological and psychiatric diseases such as the depression. Non-invasive BCIs have already been applied to fatigue driving detection, gaming and entertainment, etc. (5) Rapid development of the industry. The output value is growing rapidly, and the corporate R&D is active. In the future, the cost of BCIs will be significantly reduced, and the bidirectional interaction between the brain and machines will be achieved, bringing the transformative changes to many fields such as healthcare, education and entertainment.

Key words: brain-computer interface; neural interface; neural codec; brain-computer interaction

脑机接口 (brain computer interface, BCI) 是指在人脑与计算机或其他电子设备之间建立的直接交流和控制通道，通过这种通道，用户可直接通过大脑思维来表达想法或操纵设备。脑机接口涉及的关键技术包括信号采集技术 (核心部件为电极、芯片)、信号处理技术 (编解码算法等)、外设控制技术 (如机器人、仿生臂等) 以及神经调控技术 (如深部脑刺激等)。脑机接口为人脑功能研究提供了重要方法，为脑疾病临床诊治提供前沿探索工具^[1]。2024年，是人类脑电波 (electroencephalogram, EEG) 被发现 100 周年，*Nature* 将 BCI 视为 2024 年度值得关注的七大技术之一^[2]。国内外 BCI 领域发展迅猛，多个侵入式 BCI 进入临床试验。BCI 已被视为下一个生命科学和信息技术交叉融合的主战场。清华大学高小榕教授在 2024 中关村论坛年会上表示，BCI 经过近 50 年的发展，现在已经进入了技术爆发期^[3]。

1 相关科技布局

2024 年各国脑计划新增资助 BCI 项目。例如，美国“通过推动创新型神经技术开展大脑研究 (BRAIN)”计划资助了系列神经记录调控与刺激项目，涉及的领域包括新型神经记录与调控技术及相关仪器、设备的开发与概念验证、精确量化与记录人类行为及其大脑活动、侵入式脑机接口临床试验等^[4] (表 1)。此外，美国 NIH 于 2024 年启动新一期的“蓝图医疗科技”计划 (Blueprint MedTech)，该计划的总体目标是加速患者获得开创性、安全和有效的医疗设备。该计划将为医疗设备 (包括脑机接口) 研发提供支持，并促进医疗设备转化到市场^[5]。

由于认识到“神经记录与调控”的重要性，美国 BRAIN 计划 2020 年新增了该研究方向，之后每年在年底发布下一年该方向的项目招标指南。进一步分析发现，该方向由 2020 年以资助神经记录与

表1 美国BRAIN计划2024年神经记录与调控主题资助的项目

题名	主要研究内容
神经系统记录与调控的新概念和早期研究	处于早期开发阶段的独特和创新型记录和(或)调控技术, 包括处于概念化初始阶段的新的和未经测试的想法。适用于多种记录方式, 包括声学、化学、电学、磁学和光学, 以及遗传工具的使用等
在人脑中使用时侵入性神经记录和刺激技术的探索性研究	组建跨学科团队, 开发侵入性神经记录与刺激技术, 验证新技术原理、可行性, 并进行早期开发工作
优化用于神经系统记录与调控的仪器和设备技术	通过与最终用户的迭代测试来优化现有或新兴技术的应用程序。这些技术和方法有望解决与细胞(即神经元和非神经元)和网络的记录与调控相关的重大挑战, 实现对中枢神经系统动态信号的变革性理解
神经系统记录和调控的新技术和新方法	开发极具创造性的方法, 以解决在细胞分辨率或接近细胞分辨率水平记录和调控 CNS 活动相关的重大挑战。可以是各类技术, 如光学、磁学、声学(或)基因操作等
大脑行为量化与同步	支持能精确量化人类行为并将其与同时记录的大脑活动联系起来的下一代平台和分析方法的开发和验证。用于分析行为的工具应该是多模态的, 并且应该能够与大脑活动相关联, 因而能够准确、特异性、灵活地测量和调控行为相关的大脑环路活动
在人脑中使用时侵入性神经记录和刺激技术	使用先进、创新技术研究行为相关的动态神经环路功能的跨学科研究, 旨在通过系统地控制刺激和(或)行为, 同时主动记录和(或)操纵神经活动的相关动态模式, 并通过测量由此产生的行为和(或)感知来了解中枢神经系统相关环路的动态与功能
推进下一代人类中枢神经系统记录与调控侵入性设备的临床研究	支持新型侵入式脑机接口治疗中枢神经系统疾病的临床试验, 鼓励研究人员开展转化活动和小型临床研究
人类中枢神经系统中新型记录和调控技术的临床前概念验证	支持用于人类使用的下一代记录和(或)调控设备的开发, 从概念验证到临床前测试, 以进一步了解人类中枢神经系统并治疗神经系统疾病
通过 Blueprint MedTech 将开创性技术从早期开发转化为早期临床研究	鼓励转化新型神经技术, 由美国BRAIN计划提供资助并由NIH“蓝图医疗科技”计划监督。鼓励学术和小企业合作开展非临床验证研究, 鼓励支持开发和转化开创性神经技术

调控新技术的概念验证和早期研究为主, 逐步转变成 2024 年的以临床前验证、临床试验为主, 并重视相关仪器、设备等产品的开发。此外, 美国食品药品监督管理局 (FDA) 已为侵入式脑机接口建立了相对完善的监管途径, 有望促进美国侵入式 BCI 的发展^[6]。除 BRAIN 计划外, 美国国防部高级研究计划局也资助了系列脑机接口项目, 尤其是脑机接口的医疗和军事应用。

2024 年, 欧盟“地平线欧洲”计划新增资助了 18 个脑机接口项目, 涉及的领域包括神经假体开发、开发生物标志物评估 BCI 在医疗应用中的效果、BCI 应用于解码脑功能、脑机接口新型材料研发、人才培养等^[7]。

我国科技创新 2030—脑科学与类脑研究重大项目第一期资助了新型无创脑机接口技术、柔性脑机接口、面向运动和意识障碍康复的双向-闭环脑机接口等项目, 未来该重大项目将加大对脑机接口、类脑智能领域的资助。工信部《关于推动未来产业

创新发展的实施意见》将脑机接口列入未来产业十大标志性产品, 并提出脑机接口专项政策文件。北京市、上海市相继出台各自的脑机接口创新发展行动方案。北京市科委等机构发布的《加快北京市脑机接口创新发展行动方案(2025—2030年)》从技术突破、平台打造、集群培育、场景建设、标准创制等 5 个方面部署了 15 项重点任务, 形成 3 项保障措施^[8]。上海市经济和信息化委员会发布关于征集脑机接口、具身智能等人工智能重点产业项目的通知, 在脑机接口方向支持侵入式、半侵入式、非侵入式脑机接口产品研发和产业化, 支持脑控机器人、外骨骼机器人、智能辅具等核心设备发展^[9]。上海市 2024 年度“科技创新行动计划”脑机接口立项 10 个项目, 涉及自适应闭环侵入式脑机接口治疗系统、相关数据开放共享平台建设等^[10]。上海市科委发布的《上海市脑机接口未来产业培育行动方案(2025—2030年)》, 分 2027 年、2030 年提出分阶段主要发展目标, 并从加速脑机接口产品化、

构建共性技术研发服务平台、推动临床试验与应用示范、健全产品标准与检测体系、培育产业创新生态 5 个方面提出 17 条政策措施^[11]。

比较美国、欧洲及我国的脑机接口相关科技布局可以看出,美国更重视脑机接口关键部件——记录电极、芯片的开发,以及脑机接口在医疗和军事中的应用;欧盟重视脑机接口材料和科研应用;我国资助了有创、无创脑机接口,以及医疗领域的脑机接口开发,并将脑机接口作为未来产业进行重点培育,北京、上海等地重点部署了地区脑机接口研发专项和产业培育行动方案,重点支持后端的产品研发与产业化、相关数据库的建设,培育脑机接口产业生态系统。

此外,我国还重视相关标准和伦理安全问题。我国 2021 年牵头建立首个脑机接口国际标准《信息技术 脑机接口 术语》^[12],2024 年又进一步推动国内标准制定,出台伦理、安全指南。例如,《信息化标准建设行动计划(2024—2027 年)》着重提及推进脑机接口标准研究,加强输入-输出接口、脑信息编解码算法、脑信息安全与隐私保护等关键技术和应用标准研制。国家药监局已立项《采用脑机接口技术的医疗器械 术语和定义》《采用脑机接口技术的医疗器械 具备闭环功能的侵入式神经刺激器感知与响应性能测试方法》2 个项目^[13];已出台《脑机接口研究伦理指引》《神经系统疾病脑机接口临床研究实施与管理的中国专家共识》等文件,规范脑机接口伦理管理,加强临床实践指导。

2 2024年趋势与进展

2024 年,BCI 领域进展主要表现在:多个柔性新型接口和电极被开发出来,如石墨烯电极;大模型被应用到 BCI 编解码中,推动编解码算法进步;多款侵入式 BCI 进入临床试验,全球已经开展了 70 多例侵入式 BCI 临床试验;应用领域进一步拓展;BCI 产业产值快速增长,企业研发活跃。

2.1 关键技术取得突破

2.1.1 新型电极与接口等硬件相继被开发

脑机接口硬件包括脑电采集设备和脑电信号处理设备。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。2024 年主要在新型接口、电极材料两方面取得重要进展。

新型神经接口正朝着最小侵入性、高灵敏度以及稳定记录方向迈进。例如,剑桥大学成功研发出一种新型神经袖套,该袖套以 4 μm 厚的高分子聚

合物为基底,整体厚度仅为 10 μm ,实现了对外周神经的最小侵入性接口连接^[14]。韩国基础科学研究所纳米医学中心与延世大学合作开发出神经动力学磁生接口(Nano Magnetogenetic Interface for NeuroDynamics, Nano-MIND),该接口利用磁性无线方式,实现了对深部脑神经环路的远程精确调控^[15]。中国科学院上海微系统与信息技术研究所制备了稳定的蚕丝蛋白电子神经器件,该器件实现了电生理稳定记录和高灵敏识别癫痫信号^[16],为神经疾病的诊断和治疗提供了有力的支持。南方科技大学开发出一种可拉伸、自卷微流体电子设备,作为顺应性神经接口,能够实时监测癫痫样活动,记录动作电位并调节心率^[17]。该设备不仅提高了神经接口的舒适度和适应性,还为神经疾病患者的长期监测和治疗提供了可能。浙江大学第二附属医院提出利用脉冲红外神经刺激开发视觉皮层假体的新思路。他们通过精密光纤接口对接麻醉猫的视觉皮层,实现了亚毫米精度的刺激^[18],为视觉修复和神经可塑性研究开辟了新途径。

材料的改进能较大程度地提高脑机接口电极的脑电信号采集性能。与传统的金属电极相比,石墨烯作为二维晶体材料,用作脑机接口电极具有高导电性和低阻抗、生物相容性和无毒性、机械柔韧性和弹性强、抗腐蚀和抗汗水等众多优点,成为 BCI 电极材料改进的焦点。西班牙加泰罗尼亚纳米研究所开发了纳米多孔石墨烯薄膜微电极,实现了体内高分辨率神经记录和刺激,其特点是允许制造小型微电极(直径 25 μm),同时实现低阻抗($\sim 25 \text{ k}\Omega$)和高电荷注入^[19]。加州大学圣地亚哥分校开发了由高密度石墨烯微电极阵列组成的侵入式电极,克服了石墨烯的量子电容极限,并将微电极直径缩小到 20 μm ,引入了层间掺杂的双层石墨烯以防止开路故障,能同时实现电生理记录、光学成像和刺激,还能预测单细胞的钙活性^[20]。

2.1.2 大模型初步应用于脑电解码

2024 年,大模型被初步应用于对 BCI 的脑电数据进行解码。例如,悉尼科技大学开发的 DeWave,使用量化变分编码器来推导离散的密码编码,并将其与预训练的语言模型高效对齐,使得 EEG 信号处理更加智能化。纽约大学研发的新型神经语音解码系统,利用轻型卷积神经网络将复杂的语音编码为可解释的语音参数,并通过可微分语音合成器重新合成自然语音。该系统能处理不同空间采样密度及大脑左右半球脑电信号,展现出强大的语音解码

潜力, 为实现高效、自然的语音交互迈出重要的一步^[21]。日本关西学院等机构的研究人员提出基于模糊推理的BCI系统, 能在几小时内完成测量到训练的过程, 并探索了EEG与肌电图(electromyogram, EMG)的整合以捕捉连续运动^[22]。上海交通大学与零唯一思合作开发的LaBraM模型, 能高效处理多样脑电数据, 经无监督训练实现通用表征, 从而快速适配下游任务。LaBraM在20个数据集、累计2 500 h的EEG数据上进行了预训练, 在多项任务上超越现有的最优方法^[23], 展现出强大的泛化性能。华东理工大学与百度合作, 将百度的文心一言大模型集成到BCI系统中, 让用户通过脑语言模块轻松输入需求, 如同用遥控器般适应多场景, 极大地提升了BCI系统的灵活性与实用性^[24]。

由于认识到高质量的脑电数据集在脑机接口落地应用中的重要性, 多所高校和研究机构正积极构建大规模、高质量的数据库。例如, 天桥脑科学研究院联合复旦大学附属华山医院正在建设全球最大的脑电数据库, 南方科技大学构建了ChineseEEG数据集^[25], 清华大学、中国信息通信研究院、北京协和医学院团队公开目前最大的双频稳态视觉诱发电位数据集, 超过100名参与者^[26]。

2.2 多款侵入式产品进入临床试验

脑机接口领域技术进步推动相关产品临床试验。目前, 全球已有20多个研究组开展侵入式BCI产品临床试验超过70例。国际临床试验使用了8家厂商生产的6种电极, 分别是Blackrock公司生产的微电极阵列(microelectrode array, MEA), Medtronic、Clnatec公司和PMT公司生产的皮层电极(electrocorticography, ECoG), Synchrom公司的血管内阵列(endovascular array, EVA), Neural Signals公司的神经营养电极(neurotrophic electrode, NTE), Neuralink公司和脑虎科技公司的柔性深部电极, 以及博睿康公司的硬膜外电极。

2024年, 多个国际企业相继开展BCI临床试验。Neuralink公司成功开展了2项临床试验。在首位受试者中, 体内植入物中85%的电极丝产生了移位, 导致许多无法接收到信号的线程被关闭, 但Neuralink公司迅速采取了应对措施, 不仅优化了记录算法, 使其对神经群体信号更加敏锐, 还改进了信号转化为光标移动的技术, 提升了用户界面体验。第二位受试者表现良好, 至今尚未出现电极丝移位问题, 并已成功掌握了通过意念控制鼠标进行游戏、CAD画图等操作。Precision神经科学公司也推出

其名为Layer 7的皮层脑机接口, 包含1 024个微小电极, 面积为1.5 cm², 这些电极被嵌入到能贴合大脑表面的、厚度仅为人类头发直径五分之一的柔性薄膜中。在纽约西奈山医院, 该公司成功开展了首例临床试验^[27], 将4 096个电极以微创方式植入人脑。

国内有多个产品进入临床试验。清华大学与博睿康公司联合开发的无线微创硬膜外脑机接口NEO (Neural Electronic Opportunity) 系统, 已成功植入3例患者。首例患者在植入1周年时接受了随访, 结果表明, NEO系统在这一年中始终保持安全工作, 未发生任何不良事件。患者的上肢运动和感觉功能康复取得显著进展, 充分证明了NEO系统的长期安全性和有效性。第二例受试者术后2个月内, 已经可以在普通的居家环境中实现部分BCI运动辅助功能, 团队正计划通过进一步的训练, 增强患者与电子设备的交互性。而在复旦大学附属华山医院完成的第三例植入术, 是全国首例采用“躯体感觉诱发电位+在线高频信号分析”技术完成电极植入精准定位的手术。博睿康和华山医院采用自主研发的“在线时域空域脑功能定位系统”, 无须在术中唤醒患者, 即可快速、精准定位患者的手部感觉和运动脑区, 大幅缩短手术时间并降低风险。患者术后恢复良好, 仅3天便能下床坐轮椅。值得一提的是, NEO系统已于2024年8月成为我国首款进入创新医疗器械特别审查程序的BCI产品, 预计2025年将在全国约10个临床中心开展30~50例临床试验。上海脑虎科技有限公司、复旦大学附属华山医院神经外科团队与天桥脑科学研究院合作开展了2例临床试验, 分别实现了汉语言解码和运动解码。其中, 汉语言解码临床试验的患者是一位43岁语言区占位肿瘤癫痫患者。研究人员在患者头部植入256通道的柔性脑机接口后, 患者在术后5天内实现了142个常用汉语音节下71%的解码准确率, 单字解码时延小于100 ms, 在全球首次实现了汉语言的实时解码; 在另一例运动解码临床试验中, 研究人员为一位21岁大脑运动区占位的癫痫患者植入了256通道的柔性脑机接口, 实现了整体系统延迟小于60 ms的精准运动解码。术后2天内, 患者能够通过意念“脑控”玩乒乓球和贪吃蛇游戏; 2周后, 患者通过脑虎公司自主开发的脑机操作系统XessOS, 熟练使用微信、邮箱、淘宝等常用App, 并成功“脑控”了智能家居和智能轮椅^[28]。武汉衷华脑机融合科技发展有限公司与华中科技大学同济医学院附属

协和医院合作,成功开展首例临床试验,植入其高通量、柔性硬膜外的 65 536 通道脑机接口。受试者为一位脑肿瘤患者,该接口使医生能实时监测神经信号,精准区分病变与正常脑组织,提高手术精准性,并为后续治疗提供科学依据。北京智冉医疗科技有限公司开发的高通量柔性电极,是一款同时支持采集、刺激功能的柔性电极,该电极已在浙江大学第二附属医院成功植入到首例患者体内,植入的是 1 024 通道脑机接口系统^[29]。

比较国际国内处于临床试验的侵入式产品可以看出,我国部分产品通道数高于国际水平,部分产品的安全性和稳定性高于国际水平,部分产品实现独特的汉语言解码,表明我国侵入式脑机接口技术已快速追赶国际先进水平,部分领域国际领先^[30]。

2.3 应用领域进一步拓展

BCI 现阶段的应用呈现以医疗为主、非医疗应用“多点开花”的态势。在医疗领域,2024 年研究人员持续探索 BCI 治疗各类疾病,从危重的肌萎缩侧索硬化 (amyotrophic lateral sclerosis, ALS) 等扩展到抑郁症等常见疾病。在 ALS 治疗方面,通过 BCI 技术,研究人员能够利用大脑活动来解码患者的意图,并转化为外部行动,如语音合成、肢体运动等,从而帮助患者重新获得部分或全部的生活自理能力。约翰霍普金斯大学、加州大学戴维斯分校在 BCI 恢复 ALS 患者语音功能方面都取得重要进展。前者利用 BCI 将 ALS 患者的大脑活动转化为语言,通过递归神经网络识别、解码和合成皮层脑电图信号,合成了 80% 的人类听众能够正确识别的单词,为 ALS 患者提供了可靠的交流方式^[31]。后者开发的新型 BCI 可将脑信号转化为语音,准确率高达 97%,一名 ALS 患者在使用后几分钟内即能恢复语言能力^[32],这标志着 BCI 在恢复患者语音功能方面取得重要进展。

2024 年,在用 BCI 治疗癫痫领域取得多项重要进展。埃默里大学和 NextSense 公司等机构的研究人员成功开发了独立的耳脑电图设备,该设备能够精确检测局灶性癫痫发作,并有效评估其对不同癫痫发作类型及解剖边界的敏感性^[33]。加州大学圣地亚哥分校新研制的装有微小传感器的柔性薄膜,能够紧密贴合大脑表面,实时监测神经细胞的电活动,极大地提高了脑肿瘤或严重癫痫患者手术的安全性,同时也为神经科学研究人员提供了深入了解大脑神经活动的新途径^[34]。

在运动功能修复领域,一系列成果正在为中风

患者和截肢人士带来福音。例如,RehabSwift 与阿德莱德大学开发了运动想像脑机接口 (Motor Imagery BCI, MI-BCI) 系统,能将患者想象的手部动作转化为实际动作。经过 18 次训练后,12 名慢性中风患者的手部运动得到了显著改善,并且这种改善效果持续了 4 周,为中风患者的康复之路点亮了新的希望^[35]。天津脑机海河实验室成功研发了神经驱动下肢混动外骨骼康复训练系统,有助于患者的下肢功能修复^[36]。麻省理工学院开发了一种神经义肢接口,能够将大脑信号与义肢连接,由此构建的仿生腿由人体神经系统驱动。在 14 名膝下截肢人士参与的临床试验中,仿生腿不仅帮助受试者实现与健全人相近的行走速度,还能提升他们的平衡能力,以及爬楼梯和跨越障碍的能力^[37]。

在语音/语言修复领域,2024 年研究人员利用脑机接口相继实现了英语、汉语的语音语言修复功能,为那些因疾病或伤害失去语言能力的患者开辟了新的交流途径。加州理工学院研发的语音 BCI,能从大脑解码所想词语,解码准确率高,为失语者提供了新交流途径^[38]。复旦大学附属华山医院与上海科技大学团队实现了从“意念”到汉语语句文本的解码,将汉语 BCI 拓展至“句”层面^[39],这一成果意味着汉语 BCI 技术达到了一个全新的高度。

非侵入式脑机接口被用于抑郁症诊断,标志着精神疾病治疗的重要创新。上海交通大学研究人员利用多模态情感脑机接口技术实现对抑郁症的客观评估,其核心技术是开发了高效的情绪诱发范式和情绪诱发素材,通过采集患者和正常人的大规模多模态生理数据,寻找客观评估抑郁症的数字生物标志物。目前,基于情感脑机接口的情绪“X”光机采用了深度学习算法和脑电大模型,能够自动识别六种基本情绪,即高兴、悲伤、恐惧、愤怒、厌恶和惊讶,以及中性情绪。与传统的抑郁症诊断方法相比,情绪“X”光机可以提供自动化、快速、客观的定量分析,从而使精神科医生能为患者提供更加个性化和精准的治疗方案^[40]。

非侵入式 BCI 进一步与虚拟现实、光遗传^[41]等技术结合,将应用领域拓展至生产生活的广阔领域。在生产领域,上海脑科学与类脑研究中心等团队的研究解码驾驶员紧急刹车意图,应用于复杂驾驶情境^[42];在生活和娱乐领域,琶洲实验室开发的 BCI 正念冥想系统,不仅能辅助用户提升冥想程度,还解决晕车等问题。此外,Starfish Neuroscience 公司开发的微创无线传感器和执行器,将 BCI 引入游

戏和数字交互领域, 实现了全新的互动方式。这些设备能精准捕捉用户的脑电信号, 将其转化为游戏操作或数字交互指令, 从而彻底改变人们与数字环境互动的方式。WiMi 全息云则开发基于虚拟现实脑机接口 (V-BCI) 技术的交互系统, 为用户带来更加沉浸、真实的交互体验。值得一提的是, Meta 公司将在未来几年推出神经接口手环产品, 该产品有望实现隔空打字、办公、全息下棋等多种功能。

2.4 产业产值增长迅速, 企业研发活跃

随着脑机接口技术的不断进步和越来越多产品进入临床试验阶段, 其应用领域正以前所未有的速度拓展, 推动了整个 BCI 产业的快速发展。Research And Markets 于 2024 年 11 月 11 日发布的脑机接口产业报告显示, 2024 年全球 BCI 市场规模达到 23 亿美元, 预计到 2029 年将增至 45 亿美元, 年均复合增长率达到 14.2%^[43]。BCI 市场的主要驱动力包括: AI 技术的集成, 这有助于研究人员加强 BCI 产品开发; 阿尔茨海默病和帕金森病等神经退行性疾病患病率上升, 对 BCI 的需求持续增长; 以及政府机构和产业协会对 BCI 技术开发的支持增加。增强现实 (AR) 和虚拟现实 (VR) 技术应用的进步也为 BCI 市场发展创造了机会。

国际重要公司的产品研发取得重要进展。Neuralink 公司开发的“盲视 (Blindsight)”产品, 已获得 FDA 的突破性设备认定, 有望修复失明患者的视觉^[44]。ONWARD® Medical 公司在脊髓刺激疗法方面取得重大进展: 成功植入第三例 BCI 系统, 帮助脊髓损伤患者恢复运动能力^[45]; 临床试验结果显示, 其 ARC-EX 疗法显著改善脊髓损伤患者的手部和手臂功能^[46], 其 ARC-BCI 系统被认定为 FDA 突破性设备^[47]。Synchron 公司则在智能家居设备控制方面取得突破。该公司正在试验一种用于控制智能家居设备的大脑植入物——神经假体, 该神经假体能够恢复运动信号, 使用户通过意念来控制数字设备, 该公司的 BCI 产品使 ALS 患者成功使用意念控制苹果 Vision Pro^[48]。此外, 该公司还与 OpenAI 公司合作, 推出有 BCI 聊天功能的脑机接口, 提高了用户沟通的便捷性。

国际初创公司不断加大研发力度, 相继开发出多款新型 BCI 产品, 将适应症拓展到抑郁症等常见神经精神疾病。例如, Inbrain 公司开发基于石墨烯芯片的 BCI, 用于治疗帕金森病, 计划在英国测试。德国 CorTec 公司正在开发植入电极和大脑交换植入系统, 用于中风康复。Motif 公司开发神经调节

系统, 该系统由植入物和可穿戴式耳机组成, 患者可在家中实施治疗程序。Neuroolutions 公司开发的 IpsiHand 系统, 为中风幸存者提供无创家庭康复方案。Inner Cosmos 公司开发微型植入物, 治疗抑郁症。Neurable 公司将 BCI 集成到耳机中, 发布了耳机款 BCI 设备, 可帮助用户提高注意力。

中国 BCI 行业竞争激烈, 华为、腾讯等知名企业积极布局; 大学、科研院所孵化的初创公司纷纷涌现, 在细分领域研发实力强劲。例如, 北京芯智达神经技术有限公司、博睿康两个企业与研究机构合作, 开发出侵入式 BCI, 并进入临床试验; 衷华脑机接口公司成功研发 65 000 通道双向 BCI 芯片, 居于国际领先水平, 该公司研制的 MEMS 电极键合 CMOS 电路一体化系列微针的最大通道数为 65 536^[49]。和泽科技公司开发了与生物神经网络融合的柔性神经电极, 解决了长期稳定记录难题, 其 SymNet 电极与 SymJet 植入设备实现了高精度自动化植入^[50]。北京芯智达神经技术有限公司的“北脑二号”系统实现猕猴灵巧脑控二维光标, 包含高通量电极、采集设备及神经解码算法^[51]。

3 展望

尽管近年来脑机接口技术取得了显著进步, 多款创新产品已步入临床试验阶段, 但无论是侵入式还是非侵入式脑机接口, 均面临一系列共同的问题与挑战。首先, 在基础研究层面, 脑机接口所依赖的神经编解码机制尚需更深入的科学突破。其次, 硬件方面, 如何实现高通量、安全且持久的脑电记录仍是亟待解决的问题。第三, 软件层面的挑战在于如何高效地编解码脑电信号。相比较而言, 非侵入式接口若要获得更广泛的应用, 必须提升其舒适度、美观度、便携性与易用性, 同时进一步优化交互性能; 而侵入式脑机接口面临独特的伦理、安全问题, 要实现商业推广, 必须达到低创伤 (创口越小越好)、在体内长期安全稳定工作等技术标准。

未来随着这些问题和挑战被逐步攻克, 马斯克预言, BCI 将能够治疗大多数脑部疾病, 且治疗费用有望降低至 5 000 美元^[52]。BCI 将使残疾人能够仅凭思想无缝控制各类设备, 从而重塑人类与机器的交互方式。脑机直接交流将深刻影响医疗保健、教育及娱乐等多个领域, 带来前所未有的变革^[53]。

3.1 技术展望

面对以上技术挑战, 未来, BCI 技术将呈现如下发展趋势:

(1) BCI 与大脑通过多模态信号交互,更全面地了解大脑信息活动

BCI 的信息交互模式正经历从传统以电信号为主导的单一模式,向电、光、磁、声等多模态的综合应用转型^[54]。这种多模态的信息采集与处理策略能提供更全面、详尽的大脑活动数据,进而显著提升信号的质量与解析精度。例如,光学成像技术以其非侵入性的优势,能够捕捉到高分辨率的大脑结构与功能图像;而超声刺激技术则能够在不损伤周围组织的前提下,精确地激活特定的脑区域。

(2) 硬件将小型化、高通量、集成化

未来 BCI 中的电极、芯片等硬件将向柔性、小型化、高通量和集成化方向发展,非侵入式实现可穿戴,为脑机接口的普及铺平道路^[55]。例如,瑞士联邦理工学院 (Swiss Federal Institute of Technology) 开发出一款尺寸仅为 2.46 mm² 的微型脑机接口 (MiBMI)^[56]。微纳加工技术与新型材料的广泛运用将极大地提升电极、芯片等核心组件的性能和生物相容性。与此同时,无线通信技术的快速发展也将推动 BCI 设备的便携化。可穿戴 BCI 设备有望成为家庭健康管理不可或缺的工具,为个人用户提供技术、精确的健康数据监测与分析,从而助力个人健康管理迈向新的高度^[57]。

(3) 大模型与类脑计算将融合到脑电编解码中

在编码范式方面,随着脑启发的类脑智能计算模型的开发与发展,其未来将被应用到脑电信息编解码中,开发出新型的脑启发式的编码方式。

在解码方面,未来,深度学习和大模型将进一步被融合到脑电解码中,开发出跨范式的通用脑电模型。

(4) 脑机接口与神经调控结合,实现脑机双向交互

西雅图华盛顿大学的研究人员指出,神经调控与脑机接口的协作与融合将带来新的机遇^[58]。未来,信息将在大脑与机器间实现无缝的双向流动与交互。脑机接口技术不仅能够精准读取大脑信号,还能向大脑发送精确的反馈信息,从而构建一个双向闭环控制系统,意味着 BCI 不仅能助力患者重获运动功能,还能在感知、认知等多个维度上实现显著的增强。例如,BCI 技术能够帮助中风患者恢复对肢体的控制能力,同时通过提供细腻的触觉反馈,让他们重新体验到物体的质地与温度,极大地丰富他们的感官世界^[59]。

3.2 产业发展

据摩根士丹利的研报预测,BCI 技术可能成为

未来医疗技术中的重要突破,为神经疾病患者提供新的治疗方式,并带来 4 000 亿美元的市场机遇。

未来,脑机接口产业生态系统将更加完善。BCI 将更加注重与其他前沿技术的结合,如人工智能、量子计算、纳米技术等^[60]。并且,我国多地布局脑机接口产业集聚区,推动脑机接口产业集群发展,例如北京、天津和上海均在建设脑机接口创新基地或者未来产业园,产业生态系统将更加完善。

行业竞争将加剧,技术领先企业和新兴创业公司都可能成为重要参与者。在医疗领域,BCI 有望改善神经疾病治疗,实现神经功能恢复或增强;在娱乐和教育领域,BCI 将提供沉浸式体验。

分阶段来看,未来十年,BCI 行业将聚焦医疗、娱乐、教育、智能设备和人机交互等领域,企业将加大研发投入,探索新场景和跨行业整合。尤其是在医疗应用领域,面对神经精神疾病领域庞大的、尚未被满足的治疗需求^[61],未来脑机接口技术将覆盖更多种类的疾病,提供更加精准和个性化的治疗方案^[62]。

在更远的未来,BCI 将成为下一代智能设备的核心组成部分,被广泛应用于生产、生活的各个方面,彻底颠覆人类与世界的交互方式。

技术迅猛发展的同时,伦理和安全问题越来越受到重视,确保安全、防范隐私泄露及数据滥用等风险成为研究重点,需严格临床试验与监管。同时,涉及的身份识别、意识控制等伦理问题也需要新的法律法规框架来解决。此外,通过制定统一的技术标准和规范,可以促进不同厂商之间的互操作性,加速产品的市场化进程。

[参 考 文 献]

- [1] 张旭.智能时代的脑科学与类脑智能研究.中国科学院院刊, 2024, 39: 840-50
- [2] Seven technologies to watch in 2024[EB/OL]. (2024-01-22)[2024-12-16]. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00173-x>
- [3] 脑机接口应用百花齐放, 脑数据隐私如何监管? 中关村论坛热议[EB/OL]. (2024-04-27)[2024-12-16]. <https://m.mp.oeeee.com/a/BAAFRD000020240427945153.html?layer=3&share=chat&isndappinstalled=0>
- [4] Notices of funding opportunities for 2024: neural recording and modulation[EB/OL]. (2024-01-23)[2024-12-16]. <https://www.braininitiative.nih.gov/news-events/blog/notices-funding-opportunities-2024-neural-recording-and-modulation>
- [5] Blueprint MedTech[EB/OL]. (2024-10-31)[2024-12-16]. <https://neuroscienceblueprint.nih.gov/neurotherapeutics/blueprint-medtech/blueprint-medtech>

- [6] United States sets the pace for implantable brain-computer interfaces[EB/OL]. (2024-10-09)[2024-12-16]. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-03046-5>
- [7] European Union Cordis. [2025-01-06]. [https://cordis.europa.eu/search?q=startDate%3D2024-01-01-2025-01-07%20AND%20\(%27brain%27%20AND%20%27computer%27%20AND%20%27interface%27\)&p=2&num=10&srt=Relevance:decreasing](https://cordis.europa.eu/search?q=startDate%3D2024-01-01-2025-01-07%20AND%20(%27brain%27%20AND%20%27computer%27%20AND%20%27interface%27)&p=2&num=10&srt=Relevance:decreasing)
- [8] 《加快北京市脑机接口创新发展行动方案(2025-2030年)》政策解读[EB/OL]. (2025-01-09)[2025-01-12]. https://invest.beijing.gov.cn/zwgk/zcjd/202501/t20250109_3984525.html
- [9] 上海市经济和信息化委员会关于征集脑机接口、具身智能等人工智能重点产业项目的通知[EB/OL]. (2024-06-27)[2024-12-16]. <https://www.shetc.sh.gov.cn/gg/20240627/b177eb28d8294a459bc0e0cf742ab86c.html>
- [10] 关于上海市2024年度“科技创新行动计划”技术标准、脑机接口拟立项项目的公示[EB/OL]. (2024-11-25)[2024-12-16]. <https://stscm.sh.gov.cn/zwgk/gsgg/bsgsgg/kyjhxmgs/20241125/3dfb4c61ecea46b8bb382366fde8bc0b.html>
- [11] 上海市脑机接口未来产业培育行动方案(2025-2030年)[EB/OL]. (2025-01-10)[2025-01-12]. <https://stscm.sh.gov.cn/zwgk/ghjh/20250110/020cb0c1341f4d1680f264f5c6502a91.html>
- [12] 工程所专家牵头制定ISO/IEC JTC1首个脑机接口国际标准[EB/OL]. (2021-11-17)[2024-12-16]. <https://www.bme.org.cn/xwzx/xwdt/d800674f76f74c1aba7e5d37dff71ce1.htm>
- [13] 国家药监局综合司关于《采用脑机接口技术的医疗器械术语及定义》等2项推荐性医疗器械行业标准立项的公示[EB/OL]. (2024-09-19)[2024-12-16]. <https://www.nmpa.gov.cn/directory/web/nmpa/xxgk/ggtg/ylqxggtg/ylqxqtggtg/20240919150855105.html>
- [14] Dong C, Carnicer-Lombarte A, Bonafè F, et al. Electrochemically actuated microelectrodes for minimally invasive peripheral nerve interfaces. *Nat Mater*, 2024, 23: 969-76
- [15] World's 1st mind-control magnet tech to regulate behavior, emotions, hunger[EB/OL]. (2024-07-18)[2024-12-16]. <https://interestingengineering.com/innovation/brain-control-magnetic-nanoparticles>
- [16] Yang H, Zhu Z, Ni S, et al. Silk fibroin-based bioelectronic devices for high-sensitivity, stable, and prolonged *in vivo* recording. *Biosens Bioelectron*, 2025, 267: 116853
- [17] Dong RH, Wang LL, Li ZB, et al. Stretchable, self-rolled, microfluidic electronics enable conformable neural interfaces of brain and vagus neuromodulation. *ACS Nano*, 2024, 18: 1702-13
- [18] Tian F, Zhang Y, Schriver KE, et al. A novel interface for cortical columnar neuromodulation with multipoint infrared neural stimulation. *Nat Commun*, 2024, 15: 6528
- [19] Viana D, Walston ST, Masvidal-Codina E, et al. Nanoporous graphene-based thin-film microelectrodes for *in vivo* high-resolution neural recording and stimulation. *Nat Nanotechnol*, 2024, 19: 514-23
- [20] Ramezani M, Kim JH, Liu X, et al. High-density transparent graphene arrays for predicting cellular calcium activity at depth from surface potential recordings. *Nat Nanotechnol*, 2024, 19: 504-13
- [21] Chen X, Wang R, Khalilian-Gourtani A, et al. A neural speech decoding framework leveraging deep learning and speech synthesis. *Nat Mach Intell*, 2024, 6: 467-80
- [22] Saga N, Okawa Y, Saga T, et al. Trial of brain-computer interface for continuous motion using electroencephalography and electromyography. *Electronics*, 2024, 13: 2770
- [23] Jiang WB, Zhao LM, Lu BL. Large Brain Model for Learning Generic Representations with Tremendous EEG Data in BCI[EB/OL]. (2024-05-29)[2024-12-16]. <https://arxiv.org/abs/2405.18765>
- [24] Bridging minds and machines[EB/OL]. (2024-11-08)[2024-12-16]. <https://enapp.globaltimes.cn/article/1322710>
- [25] Mou X, He C, Tan L, et al. ChineseEEG: a Chinese linguistic corpora EEG dataset for semantic alignment and neural decoding. *Sci Data*, 2024, 11: 550
- [26] Sun Y, Liang L, Li Y, et al. Dual-Alpha: a large EEG study for dual-frequency SSVEP brain-computer interface. *Gigascience*, 2024, 13: giae041
- [27] Mount Sinai Is First in New York to Test Revolutionary Brain-Computer Implant Designed to Map Brain Activity in Unprecedented Detail[EB/OL]. (2024-03-22)[2024-12-16]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/03/22/2850996/0/en/Mount-Sinai-Is-First-in-New-York-to-Test-Revolutionary-Brain-Computer-Implant-Designed-to-Map-Brain-Activity-in-Unprecedented-Detail.html>
- [28] 上海团队高通量植入式柔性脑机接口临床试验取得重大突破[EB/OL]. (2024-01-02)[2025-01-11]. <https://www.sh.chinanews.com.cn/swzx/2025-01-02/132074.shtml>
- [29] 柔性脑机接口新里程碑! 全球首款超薄柔性深部电极完成首例临床入组[EB/OL]. (2024-12-13)[2024-12-16]. <https://www.vbdata.cn/1518998460>
- [30] 脑机接口行业: 市场现状、发展展望、产业链及相关公司深度梳理[EB/OL]. (2024-12-31)[2025-01-11]. <https://finance.eastmoney.com/a/202412313284098513.html>
- [31] Angrick M, Luo S, Rabbani Q, et al. Online speech synthesis using a chronically implanted brain-computer interface in an individual with ALS. *Sci Rep*, 2024, 14: 9617
- [32] Card NS, Wairagkar M, Iacobacci C, et al. An accurate and rapidly calibrating speech neuroprosthesis. *N Engl J Med*, 2024, 391: 609-18
- [33] Joyner M, Hsu SH, Martin S, et al. Using a standalone ear-EEG device for focal-onset seizure detection. *Bioelectron Med*, 2024, 10: 4
- [34] This new brain-mapping device could make neurosurgery safer[EB/OL]. (2024-06-13)[2024-12-16]. <https://www.npr.org/sections/shots-health-news/2024/06/13/nx-s1-4985906/high-resolution-brain-mapping-device-neurosurgery-safer>
- [35] Darvishi S, Datta Gupta A, Hamilton-Bruce A, et al. Enhancing poststroke hand movement recovery: efficacy

- of RehabSwift, a personalized brain-computer interface system. *PNAS Nexus*, 2024, 3: pgae240
- [36] 重磅! 我国非侵入式脑机接口技术实现意念打字, 仅需约1.4秒即可输出一个字符[EB/OL]. (2024-07-16)[2024-12-16]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2024-07-16/doc-incehyna1483960.shtml>
- [37] Song H, Hsieh TH, Yeon SH, et al. Continuous neural control of a bionic limb restores biomimetic gait after amputation. *Nat Med*, 2024, 30: 2010-9
- [38] Wandelt SK, Bjånes DA, Pejisa K, et al. Representation of internal speech by single neurons in human supramarginal gyrus. *Nat Hum Behav*, 2024, 8: 1136-49
- [39] Zhang D, Wang Z, Qian Y, et al. A brain-to-text framework for decoding natural tonal sentences. *Cell Rep*, 2024, 43: 114924
- [40] 破解“薛定谔的情绪”: 情感脑机接口如何探求抑郁症“密码” | 对话上海交大吕宝粮[EB/OL]. (2024-06-05)[2024-12-16]. <https://sghexport.shobserver.com/html/baijiahao/2024/06/05/1342277.html>
- [41] Tang F, Yan F, Zhong Y, et al. Optogenetic brain-computer interfaces. *Bioengineering (Basel)*, 2024, 11: 821
- [42] Synchronous hybrid brain-computer interfaces for recognizing emergency braking intention[EB/OL]. (2024-09-24)[2024-12-16]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/brx2.56>
- [43] Brain-Computer Interface (BCI) Industry Report 2024-2029, with Patent Activity and Key Patent Grants/Publications Related to BCI Technology[EB/OL]. (2024-11-11)[2024-12-16]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/11/11/2978204/28124/en/Brain-Computer-Interface-BCI-Industry-Report-2024-2029-with-Patent-Activity-and-Key-Patent-Grants-Publications-Related-to-BCI-Technology.html>
- [44] Neuralink secures FDA approval to test futuristic device that could enable vision in the blind[EB/OL]. (2024-09-18)[2024-12-18]. <https://www.techspot.com/news/104760-neuralink-secures-fda-approval-test-futuristic-device-could.html>
- [45] ONWARD® Medical Announces Third Implant of Brain-Computer Interface (BCI) System to Restore Movement after Spinal Cord Injury[EB/OL]. (2024-09-19)[2024-12-16]. <https://www.biospace.com/press-releases/onward-medical-announces-third-implant-of-brain-computer-interface-bci-system-to-restore-movement-after-spinal-cord-injury>
- [46] Breakthrough in treatment of spinal cord injury: significantly improved hand and arm function with ONWARD® ARC-EX® Therapy[EB/OL].(2024-05-27)[2024-12-18]. <https://uk.marketscreener.com/quote/stock/ONWARD-MEDICAL-N-V-128192407/news/Breakthrough-in-treatment-of-spinal-cord-injury-significantly-improved-hand-and-arm-function-with-O-46832752/>
- [47] ONWARD® Medical and Partners Awarded Christopher & Dana Reeve Foundation Grant to Further Study Brain-Computer Interface System[EB/OL]. (2024-09-03)[2024-12-18]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/09/03/2939283/0/en/ONWARD-Medical-and-Partners-Awarded-Christopher-Dana-Reeve-Foundation-Grant-to-Further-Study-Brain-Computer-Interface-System.html>
- [48] 脑机接口助攻! 渐冻症患者成功使用意念控制苹果 Vision Pro[EB/OL]. (2024-07-31)[2024-12-18]. https://finance.sina.com.cn/tech/2024-07-31/detail-incfypp9382318.d.html?sinawapshare=newsapp&wm=3200_0001
- [49] 成功研发6.5万通道双向脑机接口芯片, 中国公司称“遥遥领先”海外[EB/OL]. (2024-03-10)[2024-12-16]. https://www.guancha.cn/industry-science/2024_03_10_727901.shtml
- [50] 国内脑机接口领域取得技术突破[EB/OL]. (2024-08-29)[2024-12-16]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1182/113496.htm>
- [51] 罗敏敏. 加速脑机接口应用[EB/OL]. (2024-09-24)[2024-12-16]. <https://www.news.cn/tech/20240924/c9b86a796bbb4caabc140c1366d30614/c.html>
- [52] 马斯克. 脑机接口将解决大多数脑疾病, 费用有望降至5000美元[EB/OL]. (2024-10-29)[2024-12-16]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2024/10/532855.shtml>
- [53] How brain-computer interfaces will reshape our lives[EB/OL]. (2024-01-23)[2024-12-15]. <https://www.insights.onegiantleap.com/blogs/how-brain-computer-interfaces-will-reshape-our-lives/#>
- [54] 吴朝晖. 脑机接口的未来发展趋势. *智能系统学报*, 2022, 17: 3
- [55] 阮梅花, 张丽雯, 凌婕凡, 等. 2023年脑机接口领域发展态势. *生命科学*, 2024, 36: 39-47
- [56] Shaeri M, Shin U, Yadav A, et al. A 2.46-mm² Miniaturized Brain-Machine Interface (MiBMI) Enabling 31-Class Brain-to-Text Decoding[EB/OL]. (2024-08-23)[2024-12-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10643873>
- [57] Zhang J, Li J, Huang Z, et al. Recent progress in wearable brain-computer interface (BCI) devices based on electroencephalogram (EEG) for medical applications: a review. *Health Data Sci*, 2023, 3: 0096
- [58] Herron J, Kremen V, Simeral JD, et al. The convergence of neuromodulation and brain-computer interfaces. *Nat Rev Bioeng*, 2024, 2: 628-30
- [59] 赵继宗. 脑机接口研究现状与展望. *中华医学信息导报*, 2023, 38: 43-52
- [60] 技术创新活跃 脑机接口加速“接入”现实[EB/OL]. (2024-01-11)[2024-12-16]. <http://www.xinhuanet.com/20240111/25bdb1d162f449d29ede00d025e49481/c.html>
- [61] GBD 2021 Nervous System Disorders Collaborators. Global, regional, and national burden of disorders affecting the nervous system, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet Neurol*, 2024, 23: 344-81
- [62] 脑机接口技术应用迈出坚实一步[EB/OL]. (2024-12-13)[2024-12-16]. <http://www.news.cn/tech/20241213/f66e940efe05429fbbefba4a70fbc2e6/c.html>