

DOI: 10.13376/j.cblls/2024006

文章编号: 1004-0374(2024)01-0039-09



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、自然科学基金委、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。



熊燕, 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, 主持和参与国家自然科学基金委-中国科学院学部“合成生物学发展战略研究”、国家重点研发计划“合成生物学”重点专项“合成生物学生物安全研究”等项目, 参与中国科学技术协会“神经科学学科方向预测及技术路线图”、“我国脑机接口产业技术路线图研究”等项目, 为国家和区域科技发展和政策管理提供决策参考。

2023年脑机接口领域发展态势

阮梅花¹, 张丽雯¹, 凌婕凡², 袁天蔚¹, 张学博¹, 朱成姝¹, 傅璐³, 韩雪³, 熊燕^{1*}

(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 上海脑虎科技有限公司, 上海 201107; 3 中国神经科学学会, 上海 200032)

摘要: 脑机接口是人脑与计算机或其他电子设备之间建立的直接交流与控制通道。由于其战略重要性, 脑机接口已经成为各国战略布局的重点。本文简要介绍了脑机接口领域的发展历程, 重点从战略布局、科研进展与产业应用等角度系统梳理了2023年该领域的最新进展, 并展望未来发展趋势。2023年, 神经编解码算法、神经探针与芯片等脑机接口领域核心技术取得重要进展, 功能性超声脑机接口等新型脑机接口不断涌现, 应用领域已经从医疗扩展到科研、娱乐等领域, 重要企业取得多项里程碑进展。未来, 脑机接口硬件将向小型化、高通量、柔性化发展, 编解码效率和质量将大幅度提升, 促进脑机接口功能从替换和恢复向改善、补充和增强转变, 应用领域将进一步拓展。随着脑机接口的广泛应用, 其伦理安全问题将受到重视。

关键词: 脑机接口; 神经探针; 神经编解码; 脑机交互

中图分类号: G353; Q189; R318; TP391 **文献标志码:** A

收稿日期: 2024-01-02; **修回日期:** 2024-01-10

基金项目: 中国科学技术协会“我国脑机接口产业技术路线图研究”项目(2022XKFZYJ003); 中国科学院文献情报能力建设专项(E3290422)子课题“生命科学与健康领域科技态势分析与服务”

*通信作者: E-mail: yxiong@sinh.ac.cn

Progress on brain computer interface in 2023

RUAN Mei-Hua¹, ZHANG Li-Wen¹, LING Jie-Fan², YUAN Tian-Wei¹, ZHANG Xue-Bo¹,
ZHU Cheng-Shu¹, FU Lu³, HAN Xue³, XIONG Yan^{1*}

(1 Shanghai Information Center for Life Sciences, Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China; 2 NeuroXess Inc., Shanghai 201107, China; 3 Chinese Neuroscience Society, Shanghai 200032, China)

Abstract: Brain-computer interface (BCI) is a technology that establishes a direct communication and control channel between the human brain and computers or other electronic devices. Due to its strategic importance, BCIs have become the focus of the strategic layout of various countries. This paper provides an overview of the development history in the field of BCIs, and systematically reviews its latest advancements in 2023 from the perspectives of strategic layout, scientific research progress and industrial application, and looks forward to the future development trend. In 2023, important progress has been made in core technologies in the field of BCIs, including neural decoding algorithms, neural probes and chips. Novel BCI technologies such as functional ultrasound brain-computer interfaces continue to emerge, and the application field expands from healthcare to brain research, entertainment and beyond. Important enterprises have made a number of milestones. In the future, BCI hardware will develop to miniaturization, high throughput, and flexibility, and the efficiency and quality of neural decoding will be greatly improved, which will promote the transformation of BCI functionality from replacement and restoration to improvement, supplementation and enhancement, and the application field will be further expanded. And ethical and safety issues on BCI will receive more attention.

Key words: brain computer interface; neural probes; neural decoding; 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。脑机接口最早可以追溯到 1924 年, 德国精神科医生 Hans Berger 在患者头部检测到微弱的脑电波, 继而发明了脑电图 (electroencephalogram, EEG), 这意味着脑机接口的雏形诞生。至今, 脑机接口先后经历了理论萌芽期、概念论证期和技术爆发期, 目前已经进入产业发展期。

自脑电图发明到 1970 年, 脑机接口领域处于理论萌芽期, 早期的脑机接口电极精度低、风险大且效果差。1970–1999 年, 脑机接口处于概念论证期。得益于计算机科学和神经科学发展, 尤其是 20 世纪 90 年代“脑的十年”, 欧美各国相继启动了大型脑计划^[1], 推动了脑机接口技术的进步。在这一阶段, 脑机接口的概念在研究界达成共识, 初步研发出“P300 拼写器”^[2]、基于运动想象 (motor imagery, MI) 的脑机接口^[3]和基于稳态视觉诱发电位 (steady-state visual evoked potentials, SSVEP) 的脑机接口^[4]; 研究人员开始重视 EEG 分析并通过 EEG 帮助严重运动障碍患者与环境或计算机通信和交互。

2000–2019 年, 脑机接口领域处于技术爆发期。

研究人员开始使用先进的脑电信号处理和机器学习算法, 并采用新型大脑信号获取技术, 开发出新的脑机接口范式。同时, 早期的脑机接口如基于 P300 和视觉诱发电位的脑机接口性能明显提升, 逐步进入临床试验。2013 年, 脑机接口开始临床应用, 如瘫痪患者控制神经假体^[5]、慢性脑卒中康复^[6]等。2015 年, Mineev 等^[7]提出了柔性神经植入物帮助提升神经义肢的长期性能的相关研究, 侵入式脑机接口进入高速发展期。2017 年, 研究人员开始利用卷积神经网络等深度学习算法进行脑电信号的编解码。2019 年, Neuralink 公司利用神经手术机器人植入 96 根电极, 直接通过 USB-C 接口读取大脑信号^[8]; 天津大学和中国电子信息产业集团联合研发出国产芯片“脑语者”。

2020 年至今, 脑机接口领域进入产业发展期, 其特点是开发出多款植入式脑机接口产品, 成立了一批初创企业, 人与机器的交互性能得到很大提升。例如, 匹兹堡大学开发了一套可实现感觉反馈的机器人假肢系统, 通过脑机接口可形成真实的“触觉”^[9]; 清华大学基于 3 通道颅内微创植入式脑机接口, 使受试者打字速度达到每分钟 12 个字符, 每个电极的等效信息传输率达到 20 比特/分钟^[10], 与 1988 年的“P300 拼写器”通信通道每分钟可以

传递 2.3 个字符相比有很大提升, 而且通过脑机接口人类用意念打字可以实现 99% 的准确率^[11]。国内外涌现出一批脑机接口初创企业, 并且取得初步成果。协同脑机接口、认知脑机接口、互适应脑机接口等新范式不断涌现, 脑机接口的应用场景进一步多元化, 从临床医学应用扩展至情绪识别、虚拟现实、游戏产业等。随着技术的发展和产业规模的扩张, 脑机接口吸引了更多关注。

1 脑机接口领域科技布局

脑机接口提供了大脑状态监测、人机信息交互与控制的全新途径, 一方面将成为全面认识大脑的核心关键技术和重要工具; 另一方面, 将实现人机智能的高度融合, 为人类创造前所未有的新智能时代, 在医疗、教育、游戏、航天和军事等领域有着广泛的应用前景, 是事关国家安全和全局的核心领域之一。由于脑机接口的巨大战略意义, 美国、欧盟、中国、日本、澳大利亚、韩国等国家和地区都积极布局脑机接口领域。

美国重点将脑机接口应用于医疗和军事领域。美国“通过推动创新型神经技术开展大脑研究”(Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, BRAIN) 的优先领域之一是开发监测和刺激人脑的设备, 如脑深部电刺激 (deep brain stimulation, DBS) 和脑机接口等技术^[12]。美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 先后启动“脑电库”“革命性假肢”“智能神经接口 (INI)”“可靠神经接口技术 (RE-NET)”“基于系统的神经技术新兴疗法 (SUBNETS)”“手部本体感受和触感界面 (HAPTIX)”“下一代非手术神经技术 (N3)”等几十个项目, 投入总金额超 10 亿美元。美国国家科学基金 (National Science Foundation, NSF) 也资助了“直接脑机接口的人机交互 (Human Computer Interaction for Direct Brain-Computer Interfaces)”等系列脑机接口项目。

2023 年 9 月结束的欧盟脑计划 (Human Brain Project, HBP) 资助了脑机接口项目, 建立了大脑研究基础设施——EBRAINS, 拥有开展脑机接口、人工智能和机器人研究的团队, 开发了生物启发的神经网络、人工智能和机器人、脑机接口等。欧盟还通过其框架计划持续资助脑机接口研发, 包括“硬件技术类”的颅内网络构建、脑电信号监测、高级行为解码、大脑决策预测等关键技术和硬件设备开发, 而“产品应用类”项目旨在开发下一代脑机接

口产品。

澳大利亚大脑联盟发展神经刺激与神经调节技术 (包括脑机接口)、神经形态芯片、脑启发的学习算法等^[13]。日本战略性国际脑科学研究促进计划 (Strategic International Brain Science Research Promotion Program, Brain/MINDS Beyond) 聚焦开发基于人工智能的脑科学技术, 并通过日本科学技术振兴机构 (Japan Science and Technology Agency, JST) 等机构资助了“解码和控制大脑信息”^[14]、“Brain-AI Hybrid”^[15] 等脑机融合、脑机接口项目。韩国“脑科学计划” (Korean Brain Initiative, KBI) 的主要方向之一是开发人脑和人工智能之间的接口技术^[16]。

我国通过重大项目资助脑机接口技术和产品研发, 并加速布局相关产业。科技部科技创新 2030—“脑科学与类脑研究”和“新一代人工智能”重大项目以及国家重点研发计划“生物与信息融合 (BT 与 IT 融合)”均重视脑机接口领域, 尤其是“脑科学与类脑研究”重大项目重点布局类脑计算与脑机智能技术及应用, 具体包括新型无创脑机接口技术、柔性脑机接口、面向癫痫诊疗的反应性神经调控脑机交互技术, 以及面向运动和意识障碍康复的双向-闭环脑机接口等^[17]。国家自然科学基金委 (NSFC) 信息科学部下设“脑机接口与神经工程”“神经信息编码与解码”“神经形态工程”三级学科资助类别, 专门资助脑机接口相关基础研究与技术开发, 并通过国家杰出青年科学基金等资助脑机接口领域的优秀人才。工业和信息化部在 2023 年 8 月底发布《关于组织开展 2023 年未来产业创新任务揭榜挂帅工作的通知》, 重点资助方向包括元宇宙、人形机器人、脑机接口、通用人工智能, 提出促进这些领域的技术开发、新技术和新产品落地应用^[18]。北京、上海、苏州等省市将脑机接口作为未来新兴产业重点培育。

2 脑机接口领域趋势与进展

2023 年是脑机接口技术快速发展的一年, 相关核心技术与产品开发、应用和产业发展方面都取得重要进展。

2.1 核心技术开发取得重要进展

无论是侵入式还是非侵入式脑机接口, 其重要组件通常包括信号采集、神经编解码、控制外设等模块。硬件包括脑电采集设备 (电极、探针等)、脑机接口芯片、神经刺激设备、外设机械控制等; 软件包括控制软件、数据分析算法、数据存储等。

脑机接口采集的信号既可以是大脑表层的宏观信号(如 EEG),也可以是颅内神经元峰电位(spike)、局部场电位(local field potentials, LFP)、皮层电位(electrocorticograms, ECoG)等。2023年,主要在相关编解码算法、新型神经探针和芯片、机器人外设等方面取得重要进展。

2.1.1 编解码算法

在计算架构方面,研究人员开发出了基于事件驱动的自适应光学神经网络(optical neural network, ONN)架构,主要由芯片上的嵌入式相变材料制成的人工神经元和人工突触组成,可通过改变光脉冲的波长和强度来改变神经元之间连接的强弱(突触可塑性),同时形成新的连接或消除现有连接(改变结构,即神经网络结构可塑性),实现并行计算和非易失性存储功能且能耗低,通过光传输和处理数据,使得在一块芯片上集成数千个神经元并以光学方式连接成为可能^[19];发布了一个基于 Meta 公司开源模型 DINOv2 的新型深度学习应用程序 Image Decoder,可以实时地解码受试者大脑活动^[20]。

在算法方面,研究人员实现了神经网络模型和人类大脑情绪表征的对齐,增强了模型的类脑特性并提升了模型情绪感知能力^[21];研发出一种基于神经调节依赖可塑性的类脑学习方法(neuromodulation-assisted credit assignment, NACA),可有效解决当前人工神经网络普遍存在的问题,即在原始任务上训练良好的神经网络在完成新任务训练后,其在原始任务上的性能急剧下降^[22];提出新型双频调制稳态视觉诱发电位(SSVEP)脑机接口范式,能够抑制现有双频 SSVEP 范式应用中不可预测的交叉调制谐波响应,特别适用于无训练场景^[23]。

2.1.2 电极与探针

研究人员重点开发了柔性电极和探针,例如可用于在微米尺度血管内记录脑信号的柔性神经探针,通过大脑内血管采集信号^[24];分别开发了可在小鼠^[25]和非人灵长类动物^[26]大脑皮层长期埋植的柔性微电极和探针,可进行长期稳定的单神经元水平信号采集与记录;研制出一种匹配内侧嗅皮层形状的植入式脑机接口微电极阵列。

2.1.3 芯片

2023年,研究人员在存算一体芯片研发方面取得重要进展。IBM 欧洲研究院和美国研究院分别开发了多核模拟存内计算(analogue in-memory computing, AIMC)芯片和类脑芯片“NorthPole”,两者都可以直接在内存中计算,其中前者用 14 nm 互补金属氧

化物半导体技术设计和制造,拥有 64 个 AIMC 内核,内核之间通过片上通信网络互连,并拥有后端集成的相变存储器,能对单个卷积层和长短期记忆单元进行额外处理,其能效是现有 GPU 的 40~140 倍^[27];后者拥有低精度、大规模并行、密集互连、高能效和空间计算的神经推理架构,提高了计算的推理速度和预测准确性,其能效与现有 GPU 相比有显著提高^[28]。研究人员还开发了一种高能效的通用神经信号处理器,采用混合神经网络设计、事件驱动处理和可重构设计等技术,可应用在低功耗的穿戴式和植入式医疗设备中^[29]。

我国研究人员研制出全系统集成、支持高效片上学习(机器学习能在硬件端直接完成)的存内计算芯片^[30];研制并实现了基于 65 nm 互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺的电流型增强动态随机存取存储器(enhanced dynamic random access memory, eDRAM)模拟存内一体芯片,大幅提高了电流型存算一体电路的计算精度与稳健性^[31];研发出新一代 8 通道脑电采集国产芯片,可面向非侵入式脑机接口与多模态神经电生理装备,广泛应用于智慧医疗、航空航天、人机交互、游戏娱乐等场景^[32]。

2.1.4 机器人外设

研究人员提出了一种通用型的神经信号操控的智能机器人(neural signal operated intelligent robots, NOIR)智能系统,基于非侵入式脑电图技术,能将 EEG 信号解码为机器人技能,其主要原理是人类定义目标,而机器人通过执行运动指令来实现目标;研究表明,NOIR 是通用型的,具备自适应能力,并在协作过程中学习人类想达成的目标,可用于多样化的任务,目前可完成 20 多项任务^[33]。另一项研究让机器人发出激光光点实现脑机接口交互^[34]。

2.2 新型脑机接口不断涌现

2023年,基于脑电信号的脑机接口在耳内脑机接口、语言脑机接口方面取得重要进展。此外,研究人员还开发出新型的通过感知脑血流量变化来记录大脑活动的超声脑机接口。

新兴的功能性超声(functional ultrasound, fUS)的工作原理是发射高频声音脉冲,测量这些声音振动在物质(例如人体的各种组织)中的回声,声波以不同类型、不同速度传播,并在各组织之间的边界反射,进而形成影像。fUS 技术具备高灵敏度、良好的时空分辨率,以及能覆盖大范围脑区的优点。2019 年的研究已经表明,基于 fUS 的神经成像技

术通过超快速脉冲回波成像, 同时感知多个脑区的脑血流量 (cerebral blood volume) 的微小变化, 可同时测量广泛分布在整个大脑中的微小神经细胞群的活动, 帮助实现脑与设备的信息交换。2023年, 研究人员进一步将 fUS 与脑机接口相结合, 开发出闭环超声脑机接口, 在 2 只恒河猴体内开展了验证实验, 并开发了一种 fUS 脑机接口数据预训练方法, 缩短了解码器达到所需精度的时长, 且该 fUS 脑机接口可以在至少 42 天内保持稳定, 未来有望被大范围推广与应用^[35]。此外, Forest Neurotech 和 Butterfly Network 公司也于 2023 年 10 月宣布将合作开发微创超声脑机接口设备^[36]。

耳内脑机接口方面取得重要进展。入耳式 EEG 系统不需要复杂的头盔或昂贵的设备, 而是通过耳机实现脑机交互, 但是设计和制作需要柔性可伸缩新材料和巧妙的结构设计, 而且受 EEG 电极位置限制, 记录的 EEG 信号会有部分信息缺失。入耳 EEG 需要相应的芯片技术支持来做到整体设备的微型化和小型化。研究人员提出了基于耳内生物电子学的视觉和听觉脑机接口——SpiralE, 可与耳道紧密贴合^[37]; 开发了一种集成在耳机周围的柔性基质上的耳内电化学和电生理传感器阵列, 可同时监测乳酸浓度和大脑状态, 有助于在真实环境中发现大脑与身体生物标志物之间的动态和协同作用, 用于长期健康监测或神经退行性疾病的检测或监测^[38]。入耳式 EEG 结合其他电生理信号用于患者长期的新陈代谢监测会是一个新的技术方向。

语音 / 语言脑机接口方面取得系列突破。研究人员开发了两个新型脑机接口: 第一项系统能使患者以平均每分钟 62 个单词的速度进行交流, 速度达到之前脑机接口的 3.4 倍, 向自然对话的速度 (160 个字 / 分钟) 迈进了坚实的步伐^[39]; 第二项系统是在大脑皮层表面放置 253 通道 ECoG 电极的阵列, 可以同时记录数千个神经元的平均活动, 并通过手术植入感觉运动皮层的左侧“面部区域”——大脑中服务于口腔和面部肌肉 (包括声道) 的部分, 从而显著提升词汇量、通信速度和语音解码的多功能性^[40]。通过脑机接口技术解码功能磁共振成像记录的皮层语义信号重建出连续语言, 可从跨皮层的多个区域分别解码连续语言^[41]。我国研究人员采用高密度皮层脑电技术 (high-density ECoG), 建立了用于汉语声调的深度学习模型, 构建的汉语言脑机接口实现了从大脑神经活动到汉语单音节声调语音的端到端合成^[42]。

2.3 应用领域持续拓展

2023 年, 脑机接口的应用领域进一步从医疗拓展到科研、娱乐消费等领域。

医疗是脑机接口的首要应用领域。2023 年, 研究人员通过脑机接口改进脑疾病诊断, 修复患者运动功能, 提升患者生活自理能力。例如, 开发了闭环神经接口——NeuralTree, 通过从脑电波中提取神经生物标志物, 识别和抑制各种神经系统疾病症状, 并通过激活位于芯片上的神经刺激器发送电脉冲来缓解症状^[43]; 开发了名为“皮质通信”(cortical communication, CortiCom) 的脑机接口, 帮助肌萎缩侧索硬化患者恢复对家用设备的控制, 实现控制设备三个月而不需要重新校准^[44]; 开发了一种脑 - 脊髓接口 (BSI), 能让大脑和参与行走的脊髓区域连接起来, 可在几分钟内完成校准, 能维持一年以上的可靠和稳定运行, 成功帮助长期四肢瘫痪患者自然控制腿部完成站立、行走、爬楼梯甚至是经过复杂地形时的运动, 有助于改善神经系统疾病导致的运动障碍的治疗^[45]。

脑机接口用于大脑结构与功能的研究。2023 年, 研究人员主要通过脑机接口研究了大脑高级认知功能。例如, 通过脑机接口奖励动物自主控制海马体活动, 实现对认知地图的操作, 这种能力可以让动物在虚拟环境中导航或移动物体^[46]; 将虚拟现实与脑机接口结合, 探测大鼠的内心想法, 发现动物有想象力, 也能想到不在它们眼前的地方和物体, 想象自己走到某处或移动到某个地点^[47]; 开发出电极 - 光极融合操作实验帽, 利用多脑高精度经颅电刺激联合近红外超扫描技术, 证明了脑间同步 (interbrain synchrony, IBS)、镜像神经元系统 (mirror neuron system, MNS) 相关脑区神经效率与协作行为的因果关联, 并发现了多脑经颅电刺激促进人类协作行为的潜在应用价值, 提出了不同时间窗口下增强协作表现的潜在经颅电刺激干预策略^[48]。

在消费与娱乐方面, 研究人员利用脑机接口技术和计算机建模技术, 通过对人类大脑听觉皮层活动的直接神经记录, 成功重建了平克·弗洛伊德 (Pink Floyd) 的音乐代表作“Another Brick in the Wall, Part 1”^[49]。此外, 德国公司 Neuro11 利用脑机接口技术帮助运动员在高压心理状态下保持冷静专注, 助力利物浦球队比赛获胜^[50]。

2.4 产业发展取得多项里程碑式突破

2023 年, 脑机接口产业产值不断增长, 投融资活跃。据 Expert Market Research 报告, 2023 年

全球脑机接口产业产值达到 19.2 亿美元, 预计 2032 年这一数值将达到 45.6 亿美元, 2024–2032 年的年均复合增长率高达 16%^[51]。驱动脑机接口市场增长的因素包括对技术研发的持续投入、人口老龄化导致的神经疾病患者数量增长等。非侵入式脑机接口市场仍占主导地位, 侵入式脑机接口市场在快速增长中。从地域分布看, 北美市场占主导地位。

在投融资方面, 国际脑机接口企业持续获得融资, 例如 Neuralink 于 2023 年 8 月在 D 轮融资中筹集了 2.8 亿美元^[52], Paradromics 已获 4 轮超 3 300 万美元融资^[53]。我国脑机接口行业在 2023 年上半年发生投融资事件 11 起, 其中深圳市应和脑科学有限公司获得数亿元投资; 柔灵科技 2023 年 3 月获数千万元天使 + 轮融资, 将脑机接口系统应用于睡眠场景^[54]; 暖阳医疗、微灵医疗、元籁科技等也获得数千万元的投资^[55]。

从重要企业角度看, 植入式脑机接口领域的代表性企业的产品研发相继达到重要阶段。Synchron 公司于 2023 年 3 月开始了名为“COMMAND”的脑机接口试验, 以测试 Synchron Switch™ 脑机接口设备的可行性, 该设备是血管内全植入式脑机接口, 可帮助严重运动损伤患者使用意念来操作计算机和移动设备^[56], 已于 2023 年 9 月 5 日完成患者入组工作。Neuralink 公司的脑机接口产品临床试验于 2023 年 5 月份获得美国食品药品监督管理局 (FDA) 批准, 并于 9 月 20 日启动首批人体临床试验招募^[57]。Neurosoft Bioelectronics 公司开发的一种新型柔性脑机接口首次在人体中进行了测试^[58]。Blackrock Neurotech 公司的名为 NeuroPort Array 的微芯片, 使身体残疾的人只用大脑即可执行任务, 已经植入了 50 多人体内^[59]。BrainGate 公司发布了植入神经接口系统临床试验的安全记录结果^[60]。Precision Neuroscience 公司^[61]和 Paradromics 公司^[53]的植入式脑机接口产品都获得 FDA 的“突破性设备”认定。Paradromics 公司开发的名为 Connexus 的直接数据接口, 是一种辅助沟通设备, 通过在脑组织中植入微小电极阵列来测量和解读脑信号, 并通过植入在胸部皮下的无线收发器将信号传输至外部设备。Motif Neurotech 公司的脑机接口产品开展了小规模、探索性的人体试验。脑虎科技公司的植入式脑机接口产品也完成了小规模临床试验的初步验证, 包括成功植入 256 通道柔性深部电极实现单神经元 Spike 信号记录、基于柔性皮层脑机接口技术实现汉语语音解码与合成等^[62]。

非侵入式脑机接口公司已经开始将脑机接口产品与虚拟现实等设备融合使用。Cognixion 公司旗舰设备 Cognixion ONE Axon 整合了无线脑机接口与增强现实, 已于 2023 年 5 月 5 日获得 FDA “突破性设备”称号, 这是首个将脑机接口与增强现实整合的设备^[63]。Meta、Valve 和其他初创公司已将扩展现实 (extended reality, XR)/ 虚拟现实 (virtual reality, VR) 与脑机接口融合使用。三星公司将脑机接口用于 XR 的感官反馈刺激领域, 利用脑机接口设备来提供逼真的感官模拟。微美全息公司积极推进 VR 和 BCI 融合的 BCI-VR 系统研发, 将 BCI-VR 系统应用在游戏娱乐领域^[64]。

3 脑机接口领域展望

未来, 新型材料的发现与应用, 以及深度学习等人工智能算法在 BCI 信号编解码中的应用, 将驱动 BCI 硬件快速升级、性能大幅提升, 进而使其应用场景多样化。

3.1 技术发展

硬件方面, 随着微纳加工技术和材料学不断发展, 采集脑电信号的电极、芯片将向柔性、小型化、高通量和集成化发展, 形成以微丝电极、硅基电极和柔性电极为主的多元化发展格局, 并且生物相容性更好。刺激技术方面, 闭环脑深部电刺激技术未来将向自适应方向发展。植入式视觉调控将由目前的开环脑机接口系统向闭环视觉调控方向发展^[65]。硬件发展的另一趋势是系统集成, 以提升脑机接口的适用性。例如, 将电极与芯片、充电装置甚至刺激部件等集成到一起形成的微系统, 能够实现信号采集、信号编解码及充电等一站式功能, 极大地提升脑机接口在临床等应用场景中的适用性和便捷性。采集的大脑信号将变得多样化, 不仅限于脑电信号。此外, 非侵入式脑机接口技术还可以结合其他指标和检测手段并行开展, 例如电场、超声波、磁场、光遗传学等。光遗传学通过将一种病毒注射到脑细胞中而使其受到光刺激; 也有研究通过血氧含量测量判断神经元活动状态, 将其作为检测大脑活动的依据。

软件方面, 利用深度学习算法和类脑智能算法, 有效提高编解码的效率和质量。在编码技术中, 被动式范式中的 P300 范式朝向界面布局优化、人脸图像拼写和融合物理刺激方向发展, 稳态视觉诱发电位刺激范式正朝向更高效、更舒适和更自然的方向发展; 在主动范式中, MI 范式正朝向更精细方

向发展, 运动相关皮层电位范式朝向多肢体运动意图解码和连续运动解码方向发展。在解码技术方面, 植入式脑机接口解码中, 未来类脑解码器将有望成为新一代解码方法, 借鉴有效神经元群体反应的机制, 可以有效去除不稳定记录以及神经元发电放电变化带来的干扰, 从而获得更为稳健的脑机接口系统; 在非植入式脑机接口解码方面, 机器学习算法的应用、迁移学习算法的进步将有力推动脑机接口的应用落地。

从功能来看, 脑机接口将由目前的以替换和恢复患者失去的功能为主, 向功能改善、补充和增强过渡转变。从信息流角度, 目前的脑电信号主要“从脑到机”, 未来将经历“由机到脑”“由脑到脑”, 脑电信号在大脑和机器之间双向流动、双向交互, 最终实现脑机融合智能。在脑机融合系统中, 大脑与大脑、大脑与机器之间互相传递信息。大脑与机器两者互相适应、协同工作, 把生物脑的感知能力与机器的计算能力完美结合, 生物和机器在信息感知、信息处理、决策判断, 甚至记忆、意图多个层次相互配合^[66]。脑机融合是脑机接口发展的必然趋势。

3.2 产业发展

在产业应用方面, 中短期内, 脑机接口将重点应用于医疗领域, 修复运动功能和感知功能, 帮助高位截瘫、渐冻人、失明患者恢复独立生活和交流能力, 满足医疗需求; 长期来看, 脑机接口将与机器人、元宇宙相结合, 进一步拓展其应用场景, 提高应用效果, 而且商业化推广和消费者教育不断加强将促进脑机接口与教育、消费、娱乐等各类应用场景进一步结合, 使其达成数十万级规模的综合市场。脑机接口有望使人们通过意识操控周围的设备, 赋予超越人类的耐力、速度、精度和效率^[67]。

此外, 随着脑机接口在临床上的应用推广, 植入式脑机接口的伦理安全问题将受到重视。科技部牵头, 联合教育部、工业和信息化部等部委印发的《科技伦理审查办法(试行)》将“侵入式脑机接口用于神经、精神类疾病治疗的临床研究”列为高风险, 需要开展伦理审查复核^[68]。我国开展了一些尝试, 但对BCI项目尚未形成共识性的临床伦理规范。例如, 脑虎科技公司与复旦大学附属华山医院正在合作研讨、制定脑机接口相关伦理共识。

【参 考 文 献】

- [1] 中国神经科学学会. 神经科学学科路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2019
- [2] Farwell LA, Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1988, 70: 510-23
- [3] Neuper C, Pfurtscheller G. 134 ERD/ERS based brain computer interface (BCI): effects of motor imagery on sensorimotor rhythms. *Int J Psychophysiol*, 1998, 1: 53-4
- [4] McMillan GR, Calhoun G, Middendorf MS, et al. Direct brain interface utilizing self-regulation of steady-state visual evoked response (SSVER)[C]. Vancouver: Proc RESNA Ann Conf, 1995
- [5] Collinger JL, Wodlinger B, Downey JE, et al. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia. *Lancet*, 2013, 381: 557-64
- [6] Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Ann Neurol*, 2013, 74: 100-8
- [7] Mineev IR, Musienko P, Hirsch A, et al. Biomaterials. Electronic dura mater for long-term multimodal neural interfaces. *Science*, 2015, 347: 159-63
- [8] Musk E, Neuralink. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels. *J Med Internet Res*, 2019, 21: e16194
- [9] Flesher SN, Downey JE, Weiss JM, et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control. *Science*, 2021, 372: 831-6
- [10] Liu D, Xu X, Li D, et al. Intracranial brain-computer interface spelling using localized visual motion response. *Neuroimage*, 2022, 258: 119363
- [11] Willett FR, Avansino DT, Hochberg LR, et al. High-performance brain-to-text communication via handwriting. *Nature*, 2021, 593: 249-54
- [12] BRAIN 2025: a scientific vision[EB/OL]. [2023-12-08]. http://www.braininitiative.nih.gov/pdf/BRAIN2025_508C.pdf
- [13] The Australian Brain Alliance[EB/OL]. [2023-12-06]. <https://ans.org.au/resources/issues/about-the-australian-brain-alliance>
- [14] Decoding and controlling brain information[EB/OL]. [2023-12-06]. https://www.jst.go.jp/presto/bmi/research_area_E.html
- [15] IKEGAYA Brain-AI Hybrid[EB/OL]. [2023-12-06]. https://www.jst.go.jp/erato/en/research_area/ongoing/jpmjer1801.html
- [16] Jeong SJ, Lee IY, Jun BO, et al. Korea Brain Initiative: emerging issues and institutionalization of neuroethics. *Neuron*, 2019, 101: 390-3
- [17] 科技部关于发布科技创新 2030——“脑科学与类脑研究”重大项目 2021年度项目申报指南的通知[EB/OL]. (2021-09-16)[2023-04-26]. https://service.most.gov.cn/kjih_tztg_all/20210916/4583.html
- [18] 北京市人民政府办公厅关于印发《北京市促进未来产业创新发展实施方案》的通知[EB/OL]. (2023-09-08). [2023-12-08]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202309/t20230908_3255227.html
- [19] Brückerhoff-Plückelmann F, Bente I, Becker M, et al.

- Event-driven adaptive optical neural network. *Sci Adv*, 2023, 9: eadi9127
- [20] Benchetrit Y, Banville H, King JR. Brain decoding: toward real-time reconstruction of visual perception[EB/OL]. [2023-12-10]. <https://ai.meta.com/static-resource/image-decoding>.
- [21] Fu KC, Du CD, Wang SP, et al. Improved video emotion recognition with alignment of CNN and human brain representations. *IEEE Trans Affect Computing*, 2023, DOI: 10.1109/TAFFC.2023.3316173
- [22] Zhang T, Cheng X, Jia S, et al. A brain-inspired algorithm that mitigates catastrophic forgetting of artificial and spiking neural networks with low computational cost. *Sci Adv*, 2023, 9: eadi2947
- [23] Sun Y, Liang L, Sun J, et al. A binocular vision SSVEP brain-computer interface paradigm for dual-frequency modulation. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2023, 70: 1172-81
- [24] Zhang A, Mandeville ET, Xu L, et al. Ultraflexible endovascular probes for brain recording through micrometer-scale vasculature. *Science*, 2023, 381: 306-12
- [25] Zhao S, Tang X, Tian W, et al. Tracking neural activity from the same cells during the entire adult life of mice. *Nat Neurosci*, 2023, 26: 696-710
- [26] Tian Y, Yin J, Wang C, et al. An ultraflexible electrode array for large-scale chronic recording in the nonhuman primate brain. *Adv Sci (Weinh)*, 2023, 10: e2302333
- [27] Le Gallo M, Khaddam-Aljameh R, Stanisavljevic M, et al. A 64-core-mixed-signal in-memory compute chip based on phase-change memory for deep neural network inference. *Nat Electron*, 2023, 6: 680-93
- [28] Modha DS, Akopyan F, Andreopoulos A, et al. Neural inference at the frontier of energy, space, and time. *Science*, 2023, 382: 329-35
- [29] Zhao S, Yang J, Wang J, et al. A 0.99-to-4.38 uJ/class event-driven hybrid neural network processor for full-spectrum neural signal analyses. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2023, 17: 598-609
- [30] Zhang WB, Yao P, Gao B, et al. Edge learning using a fully integrated neuro-inspired memristor chip. *Science*, 2023, 381: 1205-11
- [31] Song JH, Tang XY, Luo HY, et al. A calibration-free 15-level/cell eDRAM computing-in-memory macro with 3T1C current-programmed dynamic-cascoded MLC achieving 233-to-304-TOPS/W 4b Mac[C]. *San Antonio: IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2023
- [32] 天津日报. 新一代脑机接口专用采集国产芯片在津研发成功[EB/OL]. (2023-10-27)[2023-12-08]. https://www.tj.gov.cn/sy/tjxw/202310/t20231027_6441200.html
- [33] NOIR: Neural signal operated intelligent robots for everyday activities[EB/OL]. (2023-11-21)[2023-12-08]. <https://openreview.net/pdf?id=eyki3UIHa>
- [34] Kolkhorst H, Veit J, Burgard W, et al. A robust screen-free brain-computer interface for robotic object selection. *Front Robot AI*, 2020, 7: 38
- [35] Griggs WS, Norman SL, Deffieux T, et al. Decoding motor plans using a closed-loop ultrasonic brain-machine interface. *Nat Neurosci*, 2023, 27: 196-207
- [36] New Neurotech Eschews Electricity for Ultrasound Companies team up to use ultrasound-on-chip tech to develop a BCI[EB/OL]. (2023-11-23)[2023-12-08]. <https://spectrum.ieee.org/bci-ultrasound>
- [37] Wang Z, Shi N, Zhang Y, et al. Conformal in-ear bioelectronics for visual and auditory brain-computer interfaces. *Nat Commun*, 2023, 14: 4213
- [38] Xu Y, De La Paz E, Paul A, et al. In-ear integrated sensor array for the continuous monitoring of brain activity and of lactate in sweat. *Nat Biomed Eng*, 2023, 7: 1307-20
- [39] Willett FR, Kunz EM, Fan C, et al. A high-performance speech neuroprosthesis. *Nature*, 2023, 620: 1031-6
- [40] Metzger SL, Littlejohn KT, Silva AB, et al. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature*, 2023, 620: 1037-46
- [41] Tang J, LeBel A, Jain S, et al. Semantic reconstruction of continuous language from non-invasive brain recordings. *Nat Neurosci*, 2023, 26: 858-66
- [42] Liu Y, Zhao Z, Xu M, et al. Decoding and synthesizing tonal language speech from brain activity. *Sci Adv*, 2023, 9: eadh0478
- [43] A neural interface to detect and alleviate symptoms of neurological disorders[EB/OL]. (2023-01-30)[2023-12-08]. <https://www.news-medical.net/news/20230130/A-neural-interface-to-detect-and-alleviate-symptoms-of-neurological-disorders.aspx>
- [44] Luo S, Angrick M, Coogan C, et al. Stable decoding from a speech BCI enables control for an individual with ALS without recalibration for 3 months. *Adv Sci (Weinh)*, 2023, 10: e2304853
- [45] Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface. *Nature*, 2023, 618: 126-33
- [46] Lai CX, Tanaka S, Harris TD, et al. Mental navigation and telekinesis with a hippocampal map-based brain-machine interface. *bioRxiv*, 2023, DOI: 2023.04.07.536077
- [47] Lai C, Tanaka S, Harris TD, et al. Volitional activation of remote place representations with a hippocampal brain-machine interface. *Science*, 2023, 382: 566-73
- [48] Lu H, Wang X, Zhang Y, et al. Increased interbrain synchronization and neural efficiency of the frontal cortex to enhance human coordinative behavior: a combined hyper-tES and fNIRS study. *Neuroimage*, 2023, 282: 120385
- [49] Bellier L, Llorens A, Marciano D, et al. Music can be reconstructed from human auditory cortex activity using nonlinear decoding models. *PLoS Biol*, 2023, 21: e3002176.
- [50] How neuro11's brain training with the Liverpool squad works[EB/OL]. (2023-08-05)[2023-12-08]. <https://www.liverpoolfc.com/news/explained-how-neuro11s-brain-training-liverpool-squad-works>
- [51] Global brain computer interface market outlook[EB/OL]. [2023-12-08]. <https://www.expertmarketresearch.com/reports/brain-computer-interface-market>
- [52] Neuralink, Elon Musk's brain implant startup, raises \$280 million from Peter Thiel's VC fund[EB/OL]. (2023-08-08)

- [2023-12-08]. <https://edition.cnn.com/2023/08/08/tech/neuralink-brain-musk-fundraising-founders-fund/index.html>
- [53] Paradromics. Paradromics Raises \$33 Million in Funding, Achieves Breakthrough Medical Device Designation from FDA[EB/OL]. (2023-05-18) [2023-12-10]. <https://www.paradromics.com/news/paradromics-raises-33-million-in-funding-achieves-breakthrough-medical-device-designation-from-fda>
- [54] 柔灵科技获数千万元天使+轮融资, 将脑机接口系统应用于睡眠场景[EB/OL]. (2023-03-24)[2023-12-08]. <https://36kr.com/p/2182412696649219>
- [55] 中商产业研究院. 2023年全球脑机接口市场规模预测及行业投融资情况分析[EB/OL]. (2023-10-09)[2023-12-10]. <https://www.askci.com/news/chanye/20231005/003221269643589127668845.shtml>
- [56] Synchron to begin patient enrollment for the COMMAND trial of brain-computer interface at Gates Vascular Institute[EB/OL]. (2023-03-20)[2023-12-12]. <https://www.businesswire.com/news/home/20230320005156/en/Synchron-to-Begin-Patient-Enrollment-for-the-COMMAND-Trial-of-Brain-Computer-Interface-at-Gates-Vascular-Institute>
- [57] Neuralink, Elon Musk's brain implant startup, set to begin human trials[EB/OL]. (2023-09-20)[2023-12-12]. <https://edition.cnn.com/2023/09/20/tech/musk-neuralink-human-trials/index.html>
- [58] Neurosoft CEO says new brain implant is "basically 1,000 times softer" than anything on the market[EB/OL]. (2023-12-10)[2023-12-12]. <https://bigthink.com/the-future/neurosoft-brain-computer-interface/>
- [59] Utah-based Blackrock Neurotech has already microchipped at least 50 people – transhumanism in action[EB/OL]. (2023-05-02)[2023-12-08]. <https://newstarget.com/2023-05-02-blackrock-neurotech-microchipped-50-people-transhumanism.html>
- [60] Rubin DB, Ajiboye AB, Barefoot L, et al. Interim safety profile from the feasibility study of the BrainGate neural interface system. *Neurology*, 2023, 100: e1177-92
- [61] Precision Neuroscience acquires U.S. manufacturing facility and receives FDA breakthrough device designation[EB/OL]. (2023-10-05)[2023-12-05]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/10/05/2755458/0/en/Precision-Neuroscience-Acquires-U-S-Manufacturing-Facility-and-Receives-FDA-Breakthrough-Device-Designation.html>
- [62] 脑机融合智能升级 脑虎科技发布多项阶段性科研新成果[EB/OL]. (2023-07-06)[2023-12-10]. https://www.neuroxess.com/nx/news/455?env=product&lang=zh&post_id=455&type=post
- [63] Cognixion receives FDA breakthrough device designation for its brain-computer interface with augmented reality for assistive communication[EB/OL]. (2023-05-04)[2023-12-10]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/cognixion-receives-fda-breakthrough-device-designation-for-its-brain-computer-interface-with-augmented-reality-for-assistive-communication-301815743.html>
- [64] WiMi Hologram Cloud to build a BCI-VR gaming and entertainment system[EB/OL]. (2023-03-07)[2023-12-08]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/wimi-hologram-cloud-to-build-a-bci-vr-gaming-and-entertainment-system-301764326.html>
- [65] 中国信通院. 脑机接口总体愿景与关键技术研究报告(2022年)[EB/OL]. (2022-11-26)[2023-12-10]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202211/P020221126768-090197204.pdf>
- [66] 吴朝晖, 俞一鹏, 潘纲, 等. 脑机融合系统综述. *生命科学*, 2014, 26: 645-9
- [67] 陶虎. 脑机接口: 未来生命科学和信息技术交叉融合的主战场[EB/OL]. (2023-05-04)[2023-12-10]. https://www.cas.cn/kx/kpwz/202106/t20210603_4791244.shtml
- [68] 中华人民共和国科学技术部, 教育部, 工业和信息化部, 等. 关于印发《科技伦理审查办法(试行)》的通知[EB/OL]. (2023-09-07)[2023-12-18]. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgnr/fgzc/gfxwj/gfxwj2023/202310/t20231008_188309.html