

脑机接口：拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来

赵继宗

国家神经系统疾病临床研究中心 首都医科大学附属北京天坛医院, 北京 100070

摘要: 脑机接口 (brain-computer interface, BCI) 不仅是一项先进的技术, 还代表了一场跨越神经科学、人工智能、计算机科学、哲学与社会学的深刻革命。BCI 的核心价值在于突破大脑与外部世界之间的信息隔阂, 赋予人类全新的信息交互能力, 并推动智能社会的演进。作为一项颠覆性的科技创新, BCI 从根本上改变了人类与世界互动的方式, 其应用将深刻影响人类对认知、意识乃至自我存在的理解。对于神经外科而言, BCI 不仅是一项革命性的治疗手段, 更是带来了重塑传统医学范式的契机。从修复神经损伤到调节大脑功能, 从增强人的智能到塑造人机融合的未来, BCI 为神经外科提供了前所未有的可能性。该技术的发展, 不仅有助于人们更深入地理解大脑功能, 更为未来智能化医疗提供了强有力的支撑。BCI 的影响远超医学, 它牵动着未来计算模式的变革、智能增强的普及、社会伦理的审视、国家战略的部署、经济发展的动力以及国家安全的保障等各个方面。

关键词: 脑机接口; 神经外科; 神经调控; 未来医学; 国家战略

Brain-Computer Interface: A Revolutionary Technology Expanding the Frontiers of the Human Brain and the Future of Neurosurgery

Zhao Jizong

National Clinical Research Center for Neurological Diseases, Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070 China

Abstract The brain computer interface (BCI) is not merely an advanced technology but also represents a profound revolution spanning neuroscience, artificial intelligence, computer science, philosophy, and sociology. The core value of BCI lies in its ability to break through the informational barriers between the brain and the external world, endowing humans with novel capabilities for information interaction and propelling the evolution of an intelligent society. As a disruptive technological innovation, BCI fundamentally alters the way humans interact with the world, and its applications will profoundly influence our understanding of cognition, consciousness, and even selfexistence. For neurosurgery, BCI is not only a revolutionary therapeutic tool but also an opportunity to reshape traditional medical paradigms. From repairing neural damage to modulating brain functions, from enhancing human intelligence to shaping the future of human-machine integration, BCI offers unprecedented possibilities for neurosurgery. The development of this technology not only aids in a deeper understanding of brain functions but also provides robust support for future intelligent healthcare. The impact of BCI extends far beyond medicine, influencing the transformation of future computing paradigms, the proliferation of intelligence augmentation, the scrutiny of social ethics, the deployment of national strategies, the dynamics of economic development, and the safeguarding of national security.

keyword brain-computer interface; neurosurgery; neuromodulation; future medicine; national strategy

1 引言

自人类文明诞生以来,信息交流方式的变革始终是推动文明进步的引擎。从最初的语言和文字,到后来的计算机和互联网,每一次信息交互方式的革新都带来了社会生产力的飞跃。而脑机接口的出现,则标志着信息交互进入了一个崭新的纪元——大脑与数字世界的直接融合。在脑机接口中,有两个广泛的概念:BCI (brain-computer interface) 和 BMI (brain-machine interface),二者均旨在建立大脑与外部设备(如计算机、机械臂、假肢等)之间的直接通信通道,绕开传统神经肌肉路径^[1-2]。前者侧重与计算机系统的深度融合(双向交互),而后者侧重机械控制,强调功能替代^[3-4]。为保持术语一致性,本文以“BCI”指代脑机接口技术。

BCI的发展可追溯至20世纪60年代的早期实验,最初目的是记录和解读大脑的神经信号^[5]。随着技术的不断进步,尤其是20世纪90年代基于脑电图(electro-encephalogram, EEG)非侵入式BCI的出现,其应用领域逐渐扩大,特别是在辅助残疾人设备领域,取得了一定应用成果^[6]。进入21世纪,随着Neuralink等技术公司推动侵入式BCI技术的临床试验^[7],BCI技术进入了飞跃式发展的新阶段。与此同时,国内“脑科学与类脑研究”重大科技专项也加速了这一领域的布局,力图在全球范围内占据科技竞争的前沿阵地。

BCI的兴起不仅关乎医学和技术的突破,同样关系到国家的科技竞争力、经济发展以及社会安全。各国政府纷纷将BCI作为国家战略的核心领域之一,通过政策支持和资源投入,力求在未来全球科技竞争中占据主导地位。BCI的长远影响,不仅限于推动医学进步,还将在社会结构、经济模式、国家安全等层面产生深远的变革。

2 脑机接口的定义与分类

BCI是一种通过读取大脑电活动,并将这些活动转化为外部设备控制信号的技术。其通过信号采集、处理、输出3个主要模块,使得大脑能够与计算机或其他电子设备直接进行信息交流与互动^[8]。BCI不仅可用于神经康复、智能增强,还能够治疗多种神经系统疾病,将成为未来医学领域的核心技术之一。BCI的应用前景远超医学领域,其在智能增强、认知控制、虚拟现实等领域的潜力亦不容小觑。

根据技术的侵入性,BCI可分为如下三类:非侵入式BCI通过不接触大脑皮层的方式采集大脑信号,如EEG、功能磁共振或近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)等,风险较低,但信号精度较差,适用于智能设备控制和脑波训练等领域;半侵入式BCI通过在电极植入硬脑膜外获取神经信号,虽然风险较低,但仍需手术,设备的长期稳定性和耐用性存在挑战;侵入式BCI则通过外科手术将电极直接植入大脑皮层或深部脑结构,提供高质量信号,适用于精确神经调控,但伴随手

术风险、设备寿命和免疫排斥等问题^[9]。

目前关于BCI的前沿产品主要涵盖以下几种:(1) Neuralink的硬币芯片(<https://neuralink.com/>):由Elon Musk领导的Neuralink公司开发了一款硬币大小的手术植入设备“Link”,内含电池、芯片组和1024个微小电极(图1A)。为尽可能精确监测脑活动,该设备采用微米级电极丝阵列分散植入颅骨内的特定区域(通常在运动皮层或其他与特定功能相关的脑区),芯片通过无线方式将神经信号传输至外部设备,这些信号被解码为“运动意图”^[7]。(2) Neurable的BCI增强型耳机(<https://www.neurable.com/>):耳机配备了多个干电极传感器,能够捕捉大脑活动信号,利用机器学习算法实时分析用户的专注度和认知状态(图1B)。这些传感器集成在耳机中,采用干电极设计,便于佩戴和使用^[10]。其首款产品“Enten”利用先进的数据分析与信号处理技术,优化用户每日的高效专注时段,为用户提供了一种全新的认知健康监测和生产提升工具,具有广泛的应用前景。(3) Precision Neuroscience的电极封装膜(<https://precisionneuro.io/>):Precision Neuroscience公司基于微创且可逆的植入式芯片开发了一种用于BCI系统的创新材料。其“第七层皮层接口”(layer 7 cortical interface)是一种仅为人类头发1/5直径厚度的超薄微电极薄膜,可贴合颅骨下方的大脑皮层且不损伤任何组织(图1C)。该薄膜包含超过1024个微电极,覆盖1cm²的面积。薄膜嵌入于柔性材料中,在神经外科医生植入和移除时不会损伤脑组织,且薄膜材料经过优化,可确保与大脑组织的良好兼容性,减少免疫反应和组织损伤^[11]。(4) Synchron血管内植入支架(<https://synchron.com/>):Synchron经颈静脉插入,进入大脑的上矢状窦,最终放置于运动皮层附近(图1D)。这种微创技术避免了开颅手术,具有更高的安全性和便利性。其通过导线将Stentrode连接到胸部的接收单元,用于实时传输神经信号,

并将思维转化为无手操作的文本交流、设备控制等,为严

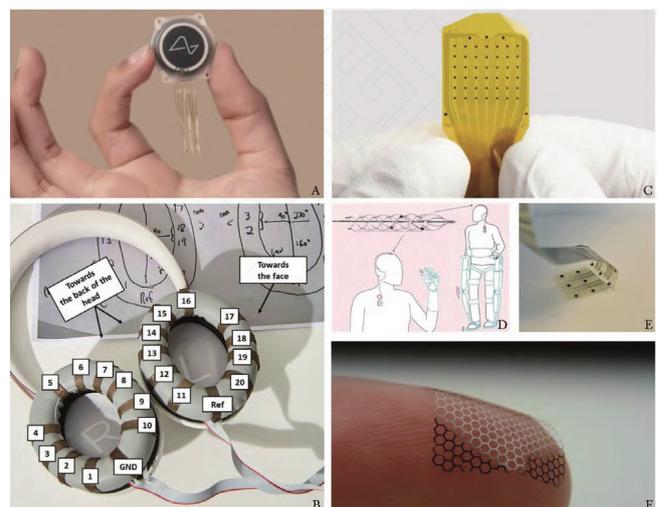


图1 脑机接口前沿产品展示

重瘫痪患者提供了一种安全、高效且灵活的脑机接口解决方案[9]。(5) Inbrain Neuroelectronics 的石墨烯芯片 (<https://inbrainneuroelectronics.com/>): Inbrain 公司在成立前,已进行了石墨烯芯片的研发,重点是确保石墨烯材料的生物相容性和稳定性。目前该产品已达到英国药品和医疗产品监管局、美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)以及 ISO 13485 标准。石墨烯芯片不仅能监测脑活动,还可进行电刺激,且信号强度远超传统金属芯片(图 1E)。Inbrain 计划于 2025 年进行首次人体试验,该试验将在马德里大学进行,用于脑肿瘤手术中识别癌细胞组织。(6) Blackrock Neurotech 的 Mesh Lace 数据采集阵列 (<https://blackrockneurotech.com/>): Blackrock Neurotech 自 2004 年起开展人体测试,旨在帮助患者恢复触觉、肢体运动能力及纯意念控制数字设备等功能。最新项目“Neuralace”为网状贴片,可贴合脑沟回结构,超大表面积支持 10 000 个神经通道信号采集,逼近全脑数据覆盖,减少了免疫反应和炎症,提高了生物相容性(图 1F)。该技术还具有可扩展性,未来可能应用于视觉假体和其他神经疾病治疗。

3 脑机接口在神经外科的突破与应用

BCI 技术不仅改变了大脑与外部世界的互动方式,更为神经外科领域带来了革命性的变革:其既是一种突破性的治疗手段,又为手术技术、诊断体系和康复方式的革新提供了新视角,极大地拓宽了医学治疗的边界(表 1)。BCI 的出现,标志着人类已进入机遇与挑战并存的新时代,为神经外科医生提供了新的工具,同时为神经疾病开辟了全新的治疗道路。

3.1 辅助神经功能重建

3.1.1 运动解码与控制

随着 BCI 技术的发展,神经功能重建迎来了革命性变革。BCI 通过实时解码大脑神经活动信号,并将其转化为可执行指令,实现对外部设备的控制,为神经修复开辟了新路径。瑞士洛桑联邦理工学院的研究采用 BCI 植入装置采集大脑运动指令,并将其转化为脊髓电刺激信号,绕过损伤区域,恢复运动功能,不仅恢复了大脑指令的传递能力,还促进了神经重塑与功能恢复,提供了大脑与肢体的有效连接^[12]。对于脑卒中患者,BCI 技术通过精准捕捉大脑运动信号,结合功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES),能够实时调整电刺激频率与强度,从而实现个性化的康复治疗^[13]。巴西 Walk Again Project 项目的技术方案主要基于 BCI 技术,通过记录患者大脑中的电活动,识别其意图并将其转化为行动。该项目通过 EEG 控制外骨骼步态训练,结合触觉反馈与虚拟现实,实现了脊髓损伤患者的部分运动功能重建,并激活了残存神经束的可塑性。BCI 技术的应用显著缩短了传统康复治疗时间,提高了治疗效果,通过推动个性化和精准的神经功能恢复,极大提升了患者的生活质量^[14]。

3.1.2 语言解码与控制

BCI 辅助神经功能重建中的语言解码是一项高度复杂的技术,涉及神经科学、信号处理、机器学习等多学科交叉。其核心目标是通过解析大脑中与语言相关的神经活动模式,将抽象的神经信号转化为可识别的语言内容(如文字或语音),从而帮助失语症患者

或语言功能障碍者恢复沟通能力。斯坦福团队在 1 例 67 岁肌萎缩侧索硬化患者的大脑体感运动皮层植入 128 个电极阵列,通过记录神经元活动并结合循环神经网络及语言模型,实现了 62 词/min 的文本转换(125 000 词库错误率为 23-8%,50 词库错误率降至 9-1%)^[15]。我国张复伦教授团队则在 1 例 47 岁脑干卒中患者感觉运动皮层表面放置 253 个电极,通过提高伽马神经信号训练神经网络,实现 78 词/min 的文本输出(1024 词库错误率为 25.5%),并同步生成合成语音与虚拟化身面部动画。其多模态输出系统支持 119 词库下语音错误率仅为 8.2%,且通过数字化身提供视觉反馈,显著提升了沟通维度^[16]。脑虎科技与华山医院合作,利用侵入式柔性电极实现了全球首个汉语实时解码系统,支持 142 个常用音节,解码准确率为 71%,时延 <100 ms。该技术突破了汉语多音节(418 个)和声调(4 种)的复杂挑战(<https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2025/1/536985.shtml>)。上述研究通过不同技术路径(侵入式电极/皮层表面记录)分别突破脑机接口的速率与准确性边界,为失语患者提供了接近自然语速的交流可能,标志着神经工程向临床应用迈出了关键一步。

3.2 术中神经监测与功能保护

神经外科手术,特别是在脑部肿瘤、脑动脉瘤和神经损伤修复中,面临着如何避免损伤脑功能区,确保患者认知、运动和功能不受影响的巨大挑战。传统神经监测方法虽能反映脑功能状态,但在实时精确反馈方面仍存在局限。BCI 技术结合神经信号解码,为术中神经监测与功能保护带来了革命性进展。通过非侵入或半侵入方式,实时捕捉大脑电活动,并转化为可操作的数据,能够帮助外科医生精准识别运动、语言、感觉等关键脑区,动态调整手术操作,避免损伤。尤其在复杂的脑部手术(如肿瘤切除中),柔性电极贴片技术能够提供实时反馈,帮助医生避开重要脑区,确保切除肿瘤的同时最大限度保护脑功能^[17]。BCI 技术不仅能在术中精确保护神经功能,还能在术后阶段持续监测脑功能恢复进程,为康复治疗提供更精确的指导。BCI 的引入为神经外科手术带来了前所未有的精准支持,提升了手术安全性和成功率,推动神经外科手术向更高水平发展。

3.3 癫痫与帕金森病的精准干预

3.3.1 帕金森病的神经调控

神经调控技术通过向大脑特定区域植入电极进行电刺激,已在帕金森病治疗中取得显著成效。BCI 通过实时监测、闭环调控和精准干预,显著改善了传统疗法的局限性。在帕金森病

治疗中,BCI 技术使脑深部电刺激 (deep brain stimulation, DBS) 参数根据患者实时神经信号自动调整。传统 DBS 通过高频电刺激抑制基底核区异常活动,缓解震颤和僵硬。BCI 技术进一步引入闭环系统,实时监测 β 波 (21 ~ 26 Hz) 活动,动态调整刺激参数以优化疗效^[18]。这一机制大大提高了治疗效果,并减少了副作用,如运动过度和语音困难。BCI 通过实时监测大脑电活动,结合闭环神经调控系统,实现对刺激参数的动态调整,从而提升了治疗效果^[19]。

3.3.2 癫痫的神经调控

在癫痫治疗中,BCI 与迷走神经刺激术结合的

闭环系统可精确捕捉脑电信号,识别癫痫前兆并自动调整刺激参数,防止癫痫发作。约翰·霍普金斯大学的研究表明,该系统能够在癫痫发作前预测异常脑电活动,进行及时干预,有效减少发作频率^[20]。2021年,浙江大学医学院附属第二医院成功植入了中国自主研发的首个闭环神经刺激器,用于控制癫痫。该系统通过植入式电极实时采集脑电信号,利用算法(如小波分析、神经网络)检测癫痫发作前的异常放电模式,并在发作前或发作初期提供精准电刺激,有效抑制癫痫发作,实现了BCI 干预下的闭环神经刺激。BCI 技术还为医生提供了更丰富的患者数据,帮助其作出更科学的治疗决策。通过长期监测神经活动数据,医生可评估患者对治疗的反应,优化治疗方案。

4 脑机接口在神经系统疾病中的拓展与探索

4.1 阿尔茨海默病与记忆增强

阿尔茨海默病 (Alzheimer's disease, AD) 等神

经退行性疾病长期以来困扰着神经医学领域,虽然现有药物治疗有一定效果,但疗效有限。BCI 技术,尤其是脑神经调控与增强的结合,为 AD 治疗带来了全新希望。BCI 通过闭环系统精准调节大脑特定区域的神经活动,能够实时监测脑电波,根据大脑信号变化进行干预,不仅能延缓病情进程,还能恢复部分记忆功能。例如,通过刺激海马体区域,增强神经元之间的连接,促进记忆痕迹的稳定存储,从而减缓认知衰退^[21]。麻省理工学院的动物实验表明,刺激海马体特定区域可成功恢复部分记忆功能,验证了BCI 在恢复记忆方面的潜力^[22]。尽管BCI 在 AD 治疗中的前景广阔,但仍面临挑战。首先,如何精确定位和调节受损记忆区域,仍是技术发展的难题。其次,个体化治疗需克服患者脑部差异,确保优化治疗方案。

4.2 意识障碍的识别与恢复

意识障碍,尤其是植物状态和微意识状态患者的治疗,一直是神经外科领域的挑战。虽然患者的大脑仍有一定的神经活动,但传统评估方法难以准确评估其意识水平,导致其康复潜力常被忽视。EEGBCI 技术通过采集和分析脑电活动,能够实时监测意识障碍患者的神经活动,帮助识别患者潜在的意识迹象。潘家辉教授团队通过EEGBCI 成功发现一些植物状态患

者仍具备一定的认知能力,这为植物状态的诊断和治疗提供了更加客观的依据^[23]。北京天坛医院的研究进一步结合电刺激与EEGBCI 技术,取得了显著临床效果,部分微意识状态患者在治疗后表现出更高的意识反应,为意识障碍的早期诊断和干预开辟了新道路^[24]。BCI 除可识别大脑活动外,还具备实时监控调控大脑神经活动的的能力。通过解码脑电信号,BCI 可在关键时刻通过电刺激激活相关脑区,促进神经网络恢复。闭环式的干预提高了治疗精度,并缩短了治疗周期。

4.3 精神疾病的治疗尝试

随着BCI 与人工智能 (artificial intelligence, AI)

技术的结合,精神疾病治疗迎来了突破。BCI 能够通过实时监测患者的大脑信号,捕捉情绪波动、认知失调等特征,提供个性化的干预方案。抑郁症患者大脑皮层的低频波增加和高频波减少可通过BCI 解码,为治疗提供依据。AI 通过深度学习分析大脑信号,实时调整治疗方案,不仅能够提升治疗的精准度和时效性,还能减少药物副作用。BCI 通过经颅电刺激或深部脑刺激对特定脑区进行精准调控,AI 实时分析患者数据,调整刺激参数,从而可实现精准干预,提高治疗稳定性并减少药物依赖。通过实时监测与AI 算法相结合,个性化治疗方案能够避免“一刀切”,满足患者的个性化需求。此外,AI 技术还能提前识别精神疾病风险,提供早期干预,改善患者生活质量。

5 当前困难与挑战

BCI 技术在医疗和康复领域的潜力已逐渐显现,但在实际应用中仍面临一系列挑战,需要进一步的技术突破、政策支持和伦理审查,才能推动BCI 技术在神经系统疾病治疗中的广泛应用。

5.1 信号采集的精确度与稳定性

信号采集是BCI 系统的核心,直接影响系统性能

和治疗效果。非侵入式BCI 通过EEG 或NIRS 监测大脑活动,然而由于头皮和头骨的阻碍,信号精度有限,难以在高精度应用,如运动控制和癫痫发作预警中发挥作用。相比之下,侵入式BCI 可提供更高精度的信号,但面临手术风险、感染及设备老化等问题。因此,如何平衡非侵入式与侵入式BCI 的优缺点,仍是提升系统性能面临的巨大挑战。

5.2 大脑信号的解码与处理

大脑信号解码是BCI 技术的核心难题。大脑活动

复杂,涉及运动、感觉、情感、认知等多个层面。现有的机器学习和深度学习算法虽有所进展,但在实时解码和准确性方面仍面临挑战,特别是在复杂环境下的稳定性和鲁棒性^[25]。因此,提升解码算法的准确性和实时性是BCI 技术应用于临床和其他领域的关键。

5.3 伦理与隐私问题

BCI 技术可能深入到大脑的内在活动,涉及思

想、情感和记忆等敏感信息,触及“思想隐私”问题^[26]如

何保护个人隐私、确保数据的安全和合法使用,是BCI面临的重要挑战。BCI系统需要制定严格的数据保护政策,防止数据泄露、篡改或滥用。同时,BCI技术的伦理审查机制仍需完善,以避免滥用带来的社会负面影响。

5.4 成本与可及性

BCI技术研发和应用的成本较高,限制了其在医疗和康复领域的普及。尤其是在低收入国家和地区,BCI的高成本成为其广泛应用的瓶颈。为使BCI技术惠及更多患者,降低成本至关重要。除研发更低成本的设备外,还需要通过政府资助、标准化生产等途径,推动BCI的普及。

5.5 临床验证与规范化

尽管BCI技术在实验室研究中展现出潜力,但如何将其转化为实际临床治疗,并确保治疗效果的可靠性和安全性仍面临挑战。现有的临床试验和病例研究虽显示BCI对部分疾病有效,但缺乏长期效果和安全性充分数据。因此,加强临床验证,建立统一的BCI技术标准和操作流程,是推动BCI广泛应用的前提。

6 结束语

BCI与AI的深度融合,正推动神经科学和临床医学进入新纪元。在技术层面,AI算法的突破显著提升了神经信号解码能力,如DPAD(dissociativeprioritized analysis of dynamics)算法实现复杂神经模式分离,NeuroXess公司通过侵入式BCI成功输出汉字并操控机械臂;双向闭环系统与柔性电极技术可提前预警癫痫并动态调节神经活动,多模态数据融合框架(如EEG眼动协同)则将意念控制精度推至95%以上。临床应用中,BCIAI系统已在运动功能重建、语言生成、意识交互及疾病预测等领域取得突破。AI驱动DBS动态优化帕金森病症状控制效率达30%,非侵入式BCI结合机器人训练使脑卒中患者康复效果提升40%。

全球脑机接口产业正处于高速发展阶段,政策引导与技术突破共同推动行业进入爆发式增长期。例如,美国Neuralink通过FDA“突破性医疗器械”认证加速临床转化;而中国信息通信研究院和工信部联合发起成立的“脑机接口产业联盟”主导产学研协同,旨在推动脑机接口技术的科研成果转化、应用场景开拓、供应链建设、技术标准制定、人才培养和创业投融资。未来,高带宽双向接口(纳米柔性电极+光遗传学)、类脑AI模型及跨学科人才培养是研究趋势,BCIAI融合不仅将重塑神经外科诊疗范式,更指向“以脑为中心”的精准医学愿景。随着标准完善与政策落地,这一技术有望10年内从实验室迈向规模化应用,为人类脑健康与功能增强开辟全新可能。

参考文献:

[1] Isa T, Fetz E E, Müller K R. Recent advances in brain-machine interfaces [J]. *Neural Netw*, 2009, 22 (9): 1201-1202.
[2] Hofmann U G, Stieglitz T. Why some BCI should still be called BMI [J]. *Nat*

Commun, 2024, 15 (1): 6207.

[3] Karami M M. Neuroscience and brain-computer interface: bridging medicine and technology for advancing patients care [J]. *Pharmacophore*, 2024, 15 (1): 613.
[4] Nijboer F, Clausen J, Allison B Z, et al. The Asilomar survey: stakeholders' opinions on ethical issues related to brain-computer interfacing [J]. *Neuroethics*, 2013, 6 (3): 541-578.
[5] Awuah W A, Ahluwalia A, Darko K, et al. Bridging minds and machines: the recent advances of brain-computer interfaces in neurological and neurosurgical applications [J]. *World Neurosurg*, 2024, 189: 138-153.
[6] 赵继宗. 脑机接口研究现状与展望 [J]. *中华医学信息导报*, 2023, 38 (8): 8.
[7] Zhao J Z. Current status and prospects of brain-computer interface research [J]. *China Med News*, 2023, 38 (8): 8.
[8] Musk E. Neuralink. An integrated brain-machine interface platform with thousands of channels [J]. *J Med Internet Res*, 2019, 21 (10): e16194.
[9] Gao X R, Wang Y J, Chen X G, et al. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces [J]. *Trends Cogn Sci*, 2021, 25 (8): 671-684.
[10] He Q H, Yang Y, Ge P C, et al. The brain nebula: minimally invasive brain-computer interface by endovascular neural recording and stimulation [J]. *J Neurointerv Surg*, 2024, 16 (12): 1237-1243.
[11] Alcaide R, Agarwal N, Candassamy J, et al. EEG-based focus estimation using Neuroables Enten headphones and analytics platform [DB/OL]. (20210623)[20240220]. <https://www.biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2021.06.21.448991>.
[12] Khan S, Mian A, Newaz G. Thin film coatings as electrodes in neuroscience [M] // NAZARPOUR S. *Thin Films and Coatings in Biology*. Dordrecht: Springer, 2013: 301-330.
[13] Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface [J]. *Nature*, 2023, 618 (7963): 1261-133.
[14] Biasucci A, Leeb R, Iturrate I, et al. Brain-actuated functional electrical stimulation elicits lasting arm motor recovery after stroke [J]. *Nat Commun*, 2018, 9 (1): 2421.
[15] Kruse A, Suica Z, Taeymans J, et al. Effect of brain-computer interface training based on noninvasive electroencephalography using motor imagery on functional recovery after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Neurol*, 2020, 20 (1): 385.
[16] Willett F R, Kunz E M, Fan C F, et al. A high-performance speech neuroprosthesis [J]. *Nature*, 2023, 620 (7976): 1031-1036.
[17] Metzger S L, Littlejohn K T, Silva A B, et al. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control [J]. *Nature*, 2023, 620 (7976): 1037-1046.
[18] 邱文灿, 马良, 郭浩月, 等. 植入式脑机接口系统实现、临床进展与技术挑战 [J]. *生物化学与生物物理进展*, 2024, 51 (10): 2478-2497.
[19] Qiu W C, Ma L, Guo H Y, et al. The implementation, clinical progress and technical challenges of implantable brain-computer interface systems [J]. *Prog Biochem Biophys*, 2024, 51 (10): 2478-2497.
[20] Wang S, Zhu G Y, Shi L, et al. Closed-loop adaptive deep brain stimulation in Parkinson's disease: procedures to achieve it and future perspectives [J]. *J Parkinsons Dis*, 2023, 13 (4): 453-471.
[21] An Q, Yin Z X, Ma R Y, et al. Adaptive deep brain stimulation for Parkinson's disease: looking back at the past decade on motor outcomes [J]. *J Neurol*, 2023, 270 (3): 1371-1387.
[22] Li A, Huynh C, Fitzgerald Z, et al. Neural fragility as an EEG marker of the seizure onset zone [J]. *Nat Neurosci*, 2021, 24 (10): 1465-1474.
[23] Leite J, Morales-Quezada L, Carvalho S, et al. Surface EEG-transcranial direct current stimulation (tDCS)