

脑机接口技术在护理领域应用的研究进展

曹薇¹, 孙国珍^{1,2}, 李芸霞¹, 吴凡¹, 陶秀¹, 鲍志鹏²

摘要: 对脑机接口技术的概念、机制、分类, 脑机接口技术在护理领域的应用现状, 以及护理人员发挥的角色作用进行综述, 旨在为脑机接口技术应用于临床护理实践提供指导, 为制订规范化护理标准和管理策略提供参考, 促进临床应用的安全性和可行性。

关键词: 脑机接口; 护理; 护士角色; 信号质量维护; 患者赋能; 智慧病房; 护理产品; 综述文献

中图分类号: R47; R651.1⁺ **DOI:** 10.3870/j.issn.1001-4152.2026.10.124

Research progress on the application of brain-computer interface technology in the field of nursing

Cao Wei, Sun Guozhen, Li Yunxia, Wu Fan, Tao Xiu, Bao Zhipeng, School of Nursing, Nanjing Medical University, Nanjing 211166, China

Abstract: This article focuses on the concept, mechanism, and classification of brain-computer interface (BCI) technology, as well as its current application status in the field of nursing and the roles played by nursing staff. It aims to provide guidance for the application of BCI technology in clinical nursing practice, offer references for formulating nursing standards and management strategies, there by promoting the safety and feasibility of clinical application.

Keywords: brain-computer interface; nursing; nurse role; signal quality maintenance; patient empowerment; smart ward; nursing products; literature review

大脑作为中枢神经系统的核心组成成分, 其与外在的行为、内在情感间的正常连接是维持机体健康的关键所在。连接作用若受损会导致患者出现功能障碍, 并使得长期照护需求增加, 从而对医疗服务与公共卫生体系造成沉重负担^[1]。传统的外在干预虽能满足患者基本需求, 但仍未从根本上解决问题。在此背景下, 脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI) 技术受到关注并逐渐应用于相关临床领域。BCI 是指大脑和外部设备的直接联系^[2], 在多个领域具有开创性潜能, 尤其是在医疗保健领域, 针对疾病的诊断、治疗和康复具有广阔前景^[3-4]。国务院七部门联合于 2025 年发布的《关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见》中强调要建立安全可靠的 BCI 产业体系, 并部署了打造高性能产品、推动技术成果应用等重要任务^[5]。但目前相关研究多聚焦于 BCI 技术开发与临床医疗应用, 针对护理领域的系统性整合较为缺乏。因此, 本文从护理视角系统梳理 BCI 技术的发展与应用, 以期为后续护理临床实践与研究提供参考。

1 BCI 技术概述

1973 年, 美国加利福尼亚大学 Vidal 教授首次提出了 BCI 的概念, 其指出大脑皮层存在的电活动在特定诱发指令下具有局部性和特异性的特点。通过对

不同复杂程度的脑电信号波形溯源可解码患者意图, 可命令控制外部设备, 进而实现相应功能^[6]。1988 年, Farwell 等^[7]在计算机屏幕上显示字母表的 26 字母和其他指示符, 受试者在观察到闪烁矩阵的行列包含所选字符的元素时, 大脑会触发 p300 信号, 计算机捕获此信号后, 可帮助受试者完成正确拼写。我国 BCI 技术正从实验室走向临床, 从概念验证逐步迈向初步应用阶段, 首都医科大学宣武医院神经外科癫痫临床诊疗与研究率先开展了 BCI 闭环神经刺激系统临床植入手术^[8]。2025 年天津市环湖医院天塔院区是全国首个落地的 BCI 综合临床实验病区, 70 余例脑卒中患者数据表明运动参数、步态等方面均有较大改善^[9]。2026 年初, 海南省老年病医院 BCI 康复治疗中心揭牌成立, 建立老年脑卒中患者以非侵入式 BCI 技术为核心的专业康复机构, 开展一对一方案制订^[10]。国家医疗保障局也正式规范 BCI 临床操作的价格^[11]。如今, BCI 技术发展日趋成熟, 已被越来越多地应用于运动康复^[12-14]、认知和情绪管理领域^[15]。

BCI 技术主要包括信号采集、信号处理、医疗干预 3 个部分^[4]。BCI 通过电极采集脑电信号, 常用形式包括头戴式、耳戴式等。信号处理包括预处理、特征信号识别和分类。首先对原始信号中的杂音进行预处理, 以减少眼电、肌电等其他信号的影响, 接着提取特征性信息, 进而分类识别出生理或情感模式。干预是将分类结果转换为对外部设备的控制命令或反馈信号的输出^[16]。BCI 采集的信号多为脑电图, 常用的脑电信号采集方式包括 P300、稳态视觉诱发电位和运动想象。P300 是通过捕捉获取目标信息后 300

作者单位: 1. 南京医科大学护理学院 (江苏 南京, 211166); 2. 南京医科大学第一附属医院心血管内科

通信作者: 孙国珍, gzsun100@126.com

曹薇: 女, 硕士在读, 学生, 2089640574@qq.com

科研项目: 国家自然科学基金资助项目 (72074124); 江苏高校优势学科建设工程四期项目“护理学”(苏教研函〔2023〕11 号); 江苏省青年科技人才托举工程 (JSTJ-2025-386)

收稿: 2025-12-10; 修回: 2026-02-23

ms 出现正向波峰的事件相关电位^[7]；稳态视觉诱导电位通过识别与目标选项相同频率的脑电信号；运动想象则获取想象特定的脑电信号。近年来脑磁图、功能性近红外光谱等技术也被引入使用^[17]。

BCI 技术可根据信号采集传感器安放位置分为侵入式、半侵入式和非侵入式 3 种。侵入式 BCI 需通过手术将电极置于大脑内部,可以规避颅骨和肌电的干扰^[18],精确度高,但安全性较差,存在围手术期感染风险,且使用时间过长易导致脑组织受损^[19-20]。半侵入式 BCI 置于颅骨和脑膜之间,安全性和信号质量达到最优平衡^[21]。非侵入式 BCI 通常利用带有若干电极的电极帽采集脑电信号,虽降低了安全风险,但极易受外部条件影响,且分辨率低,对后续信号处理要求较高。随着人工智能技术发展,深度学习等机器学习模型使得信号提取分类更加精准和高效^[22-23],并极大提高了非侵入式 BCI 的精确度^[13, 24]。

2 BCI 技术在护理领域的应用

2.1 参与智慧病房的构建

目前智慧病房构建模式仍较为单一,难以满足认知障碍、脊髓损伤、重症等患者的特殊需求,从而无法有效减轻照护人员的负担^[25]。BCI 技术的引入为智慧病房的构建提供了新思路。患者佩戴布有电极的脑电帽后,可进行脑电信号的收集,进而通过无线脑电放大器、路由器等设备将其分析处理,结合调用预先建立的语音库,可直观表达患者需求^[26]。可让偏瘫、失语等患者无需语言和肢体活动,仅通过脑电信号就能表达需求,让患者能主动参与治疗,实现信息交互;通过 BCI 获取、解码后的患者需求可以直接传送至护理和医疗系统,帮助更好的决策。

基于 BCI 技术的语音交流看护系统将脑电纳入信号采集体系,实现对患者需求的精准识别。杨玉娜^[26]研制了语音交流看护系统,包含视觉刺激、脑电信号采集、脑电信号分析和语音输出模块 4 个部分。系统通过识别 Alpha 波,进而判断是否进行信号采集。同时波段的加入也避免了电极采集无意识的脑电信息,发出错误指令,影响系统准确性。纳入 5 名大学生参与该实验,控制 Alpha 波启动准确率达 100%,拼音或音调准确选择准确率达 90% 以上。蔡旭刚等^[25]构建了基于语音与脑电技术相融合的多模态智慧病房,在语音交互模块,4 名男性青年受试者表明在控制噪声和距离的病房环境下,智慧病房控制系统的语音交互识别准确率可在 93% 以上,可实现语音聊天、音频播放、语音呼叫等功能,也可通过云端管理进行远程信息化传输,实现可视化显示和远程提醒;在脑电信息模块,6 名正常人和 4 例眼疾患者通过收集脑电信号识别眨眼信息,利用多次眨眼进行呼救报警,准确率分别在 90% 和 70% 以上。基于多模态智慧病房的构建有利于患者向护理人员及时反馈

不适、紧急呼救,减少护理工作的沟通困难,从而提升护理质量。但上述研究均在试验阶段,试验对象较少且并非全部为患者,未能深入探寻真实患者应用效果。且信号分析算法中语言内容与表达方面较为单一和生涩,有待进一步改进;同时,病房环境也更为复杂,信号采集仍面临着较大挑战。

2.2 护理产品的开发

基于 BCI 技术相关护理产品的开发有助于提升患者自我管理能力和减轻护理负担。但应用 BCI 技术的患者多需长期卧床,生活上具有诸多不便且易增加相关并发症的发生率。智能护理床的开发使得定时翻身、体位改变、生理排泄等基础问题得到解决。但市场上的智能护理床均需使用语音或按键进行操作,语言和运动功能障碍患者无法操控。基于此,张松志^[27]研发了一款基于 BCI 的智能护理床,通过改善电位刺激范式、阈值函数和算法,使得护理床正确指令达标率为 88.89% 以上,控制指令诱发操作时间小于 8 s。王湃等^[28]实时收集脑电信号,通过串行总线传输至数据处理器,对其进行解码后,通过蓝牙将信号传输至护理床控制模块,进而实现腿部上抬下放、背部上抬的动作。并且使用深度学习算法优化神经网络,提供注意力反馈,增强信号分类的准确性。在 10 名健康受试者实验中,系统平均控制准确率和信息传输速率分别为 90.84%、84.78 比特/min。杜勇^[29]设计了基于运动想象的脑电控制的智能护理轮椅,提取想象脑电信号,进行特征提取后,想象左足运动控制轮椅左转,想象右足运动轮椅右转,达到控制轮椅前进的目的。同时,利用芯片作为主传感器无线传感技术,处理大小便和实时生命体征监测。基于 BCI 技术的智能化护理产品开发不仅减轻护理人员的工作负担,更便于实时了解患者病情变化和需求,早期识别风险并加以干预。护理人员也应悉心观察临床实践中出现的问题,积极参与护理产品的开发。

2.3 BCI 技术在不同人群中的应用

BCI 技术最初用于闭锁综合征患者,后逐渐应用于脊髓损伤、脑卒中等患者群体,在运动恢复、认知功能改善、心理调控和神经重塑等方面展现出应用潜力。

2.3.1 脑卒中患者

脑卒中是指脑血管血流减少,引起对应脑区的神经功能障碍。卒中后康复是延续性卒中护理的重要环节^[30]。在一项随机对照试验中,45 例患者平均分至机器人组、BCI 组和联合组,研究证实了基于运动想象的 BCI 联合上肢康复机器人的联合组 15 例患者可以较好改善上肢功能,在一定程度上提高日常生活能力^[31]。在一项纳入 90 例患者的中医针法联合 BCI 手部康复机器人随机对照试验中,试验组的运动功能和上肢运动评分均有提高,可有效改善卒中后手功能障碍^[32]。在多模态上肢功能恢复中,研究者对 12 例患者佩戴电极帽和虚拟现

实眼镜,在面板输入毛刷感觉刺激后,基于运动想象抓取虚拟现实中的红色小球进行训练,研究发现BCI联合多模态感知反馈训练或能有效改善脑卒中患者上肢运动功能^[33]。非侵入式BCI也常与经颅电刺激结合使用以提高大脑皮层兴奋性,促进神经重塑^[34]。在中国17个中心开展的296例缺血性脑卒中患者的研究中发现,BCI组($n=150$)相较于对照组($n=146$)可以改善上肢运动功能^[30]。护理人员需对患肢运动功能进行评估,制订适宜的训练模式,为患者提供最优康复方案^[32, 35-36]。

2.3.2 脊髓损伤患者 脊髓损伤常导致损伤平面下的肢体瘫痪、感觉丧失和自主神经功能障碍。BCI技术可跨越损伤部位,实现大脑意图和肢体活动的连通。Lorach等^[37]在大脑和脊髓放入植入物,64电极的植入物收集脑电信号,并在脊髓硬膜外发出功能性电刺激的指令,受试者可在复杂地形上站立和行走,神经功能得到改善,但该研究仅由1例中青年脊髓损伤患者参与试验,推广性仍需进一步验证。1例21岁脊髓损伤男性在侵入式BCI作用下,基于运动想象触发手的功能性刺激,家用时佩戴手部矫形器刺激,实现手部抓握控制,准确率较高^[38]。但患者操作设备需较强的控制能力,更易产生疲劳感^[39]。护理人员在发现患者出现疲劳表现后应安排适当休息,提升患者治疗舒适度。

2.3.3 精神疾病患者 精神疾病患者由于神经元异常放电,易出现情感障碍。通过对脑电信号实时监测,能够精准地定位和作用于异常的神经回路,直接调节异常活动,使BCI技术的应用从运动康复延展到心理健康领域^[45]。情感脑机接口(affective Brain Computer Interface, aBCI)技术不同于应用解码信号操作外部设备的运动康复,具有治疗意义的aBCI需要对情绪进行调节,国内仍处于初步阶段^[40]。研究显示,aBCI通过读取患者的脑电信号,实现多种情绪的判别分析,利用视觉或听觉反馈,强化正确的情感通道,可调整患者的情感体验,显著降低参与者的抑郁、焦虑水平^[41-42]。Sellers等^[43]将BCI与神经调控技术如深部脑刺激相结合,BCI识别异常电活动后,深部电刺激迅速响应,实现快速精准干预。非侵入式BCI在16例意识障碍患者的临床实验中显示,通过对左右手刺激感知有助于意识水平的评估^[44]。也有研究通过患者的名字、照片等作为靶刺激,分析患者状态,从而识别意识障碍程度^[45]。

2.3.4 功能受限的老年患者 随着年龄增长,老年人会出现运动功能减弱、增龄性认知下降等问题,导致依赖性增加^[46]。基于BCI技术的机器人外骨骼、自动化轮椅和智能家居在功能受限的老年人群中得到广泛应用,可提升老年人的自理能力和生活质量^[22]。多模态BCI结合虚拟现实对15名学生和15名社区老年人开展训练任务,组织受试者观看演示视

频,并以问答形式进行复述,佩戴设备同时调整探头位置以确保信号质量,同时确保动作可被系统识别,研究显示老年人任务中的神经连接代偿机制更强^[47]。BCI系统也可通过监测脑电活动,早期识别阿尔茨海默病等高发脑病风险。及早的干预可有效降低照护负担,这种主动健康理念也契合了积极老龄化的核心^[48]。

3 护理人员的角色作用

3.1 信号质量维护 患者功能训练常结合语音交互系统,需保持精神高度集中,防止外在环境干扰。护理人员应准备单独的房间,保持适宜的温湿度,避免噪声和电磁干扰,调整显示屏与患者之间的距离,选择适当的高度^[49],但这些在日常医院和康复中心很难达到^[50]。Saha等^[19]也提出维持适宜的信噪比在非侵入式BCI中是很重要的。护理人员作为病房的管理者,应主动提供一个适宜的环境,安排合适的诊疗活动,控制医护操作的噪声音量,做好患者及家属的管理,提高患者的舒适度,营造有利于患者康复的护理环境。

同时,BCI技术提取的信号和患者表达的意图并非完全对应,由于信息的偏差可能会使护理人员出现理解误区,导致患者的需求未被满足,影响训练效果。护理人员应结合患者病情、检查指标等多方面综合考虑,降低沟通失误的可能性^[51]。在操作开展全过程中评估,利用评判性思维观察患者,了解患者病情变化,根据患者自身情况动态调整干预策略,提供优质护理^[52]。

3.2 风险预警护理 侵入式和半侵入式BCI需要颅骨钻孔或切开置入电极,围手术期具有较大感染风险^[19]。护理人员应做好无菌操作,观察体温、意识状态,早期发现感染征象。非侵入式BCI使用导电胶进行传导,护理人员应关注患者头皮状况,做好清洁护理,防止皮肤屏障受损。在发生电极脱落、信号质量下降等问题时,应及时检查设备连接情况,防止系统异常,对患者造成损害。目前,侵入式BCI仍多在实验室条件下开展,非侵入式BCI已在临床落地应用。应用过程中护理人员应保证患者饮食、睡眠等基本生理需求得到满足,重点关注安全问题,发现问题后及时处理。针对不同的患者制订个性化护理方案,并及时做好沟通解释,与患者、家属共同进行管理。

3.3 自我管理赋能 护理人员在项目开始前,应向患者及家属解释BCI的基本概念、具体目标和操作的基本方法。开展训练后,鼓励患者表达自身感受,支持自主调试设备,以期达到较高准确性。目前基于BCI技术的治疗多在医疗机构集中开展,路程、时间等成本因素导致患者依从性降低。基于BCI的神经反馈治疗正逐渐向居家化、便携化方向发展。在康复环境转变的过程中,护理人员应对患者开展居家康复

进行操作指导,包括正确佩戴头戴式设备方法、实现低电阻的导电胶使用方式和特定软件操作流程^[53],并且应对常见问题的处理、异常状况如何及时呼救等问题进行讲解,帮助患者由被动护理转向协同式护理,改善患者依从性,提升自我管理能力,实现患者居家安全照护。

3.4 心理支持 面对未知的技术,患者在操作配合中可能会出现无助的情绪问题。护理人员应在训练前采用通俗的语言、图文的方式向患者及家属介绍流程及可能出现的问题,积极开展同伴教育,以减轻患者对未知的恐惧。并提前评估患者的心理状况,判断是否存在影响训练效果的因素。研究发现,BCI 技术结合音乐疗法能够降低患者的疼痛水平^[54],有助于改善患者对治疗的排斥心理。He 等^[55]发现在导管消融术过程中,干预组 42 例房颤患者应用基于非侵入 BCI 的正念疗法降低了疼痛、焦虑和疲劳评分,也减少芬太尼的使用量。值得注意的是,部分康复模式需患者具备一定的操作基础,训练开始可能会频繁发出错误指令,患者容易出现康复倦怠,降低康复信心。在长时间训练中更容易出现疲劳、焦虑或挫败感,护理人员需实时关注患者情绪变化,及时给予心理支持,适当调整训练节奏,确保干预耐受性,并调动社会支持系统,增强患者信心。

3.5 主导多学科协调配合 护理人员作为 BCI 团队的核心执行者,主导多学科协调配合。在训练过程中,护理人员需要与工程师协调沟通,将患者的需求翻译为工程师的技术语言,进行训练参数优化,确保信号质量正常。在面对训练异常情况或病情突然变化时,及时向医生反馈,共同讨论调整康复方案或配合紧急救治,保障患者安全,帮助顺利完成训练。在康复训练的全过程中,护理人员发挥着关键链接作用,保证医、工、护三方信息通畅,为患者提供更优质的服务。

4 BCI 技术潜在风险

4.1 BCI 技术应用中的安全风险不容忽视 BCI 技术在临床应用中发挥着重大作用,但仍存在一些安全问题。Wang 等^[30]的研究中 4% 受试者出现了严重不良反应,包括神经系统紊乱、缺血性脑卒中等。《植入式脑机接口临床应用路径管理中国专家共识(2026 版)》^[56]提出,对 BCI 功能、系统性能及患者认知和生活能力进行评估是验证技术安全性的关键。护理人员应提早做好相关评估,且针对不同患者身体状况合理选择适宜的 BCI 开展模式,做好不良事件的风险评估及应急管理。在肢体康复过程中,由于患者肌肉力量没有完全恢复可能会导致二次伤害。基于 BCI 的心理疾病调控在未受到严格控制的条件下,调节失控可能会导致心理症状加重。护理人员需要及时识别异常状况,及早进行干预,准确记录,后续针对问题组

织讨论,制订预防措施。

4.2 技术应用触发伦理探讨 我国科学技术部发布了 BCI 伦理指引,提出了保障健康、提升福祉等基本原则^[57]。有学者提出 BCI 的临床应用和操作相关风险应纳入患者知情同意条目中^[58-59],护理人员应守护患者知情同意的这道防线,确保患者了解技术的益处、潜在风险及退出的权利,使患者的权益得到保障。在患者完全失去自主肌肉控制下,无法表达自身对相关决策的偏好时,BCI 技术的应用与否均需后期开展更多的研究加以验证^[51]。开展的各类试验也均需伦理评估,得到伦理委员会审批通过后方可进行^[23, 33]。BCI 采集的脑电信号信息是患者的个人隐私数据,数据采集应用的边界现在仍处于模糊状态,存在数据安全问题。aBCI 收集患者情绪信号,若数据被公开化、透明化进行恶意操控,个人情感受到外界环境控制的问题也需加以考虑。护理人员在脑电数据采集过程中应严格遵循隐私与数据安全原则,通过规范化操作、权限管理及加密措施,确保患者脑电信号在采集、存储与传输各环节中不发生泄露或被未经授权获取。针对 BCI 的相关伦理问题及数据管理方面应该得到广泛关注,如何合法使用这些数据的问题仍需进一步探讨。

5 现有研究局限性及展望

BCI 技术操作目前尚缺乏循证证据和规范标准,且对不同类别患者的作用机制尚不明晰^[39],其干预效果因受患者损伤部位和程度等因素的影响,易产生较大异质性^[60]。精神疾病患者的 aBCI 由于关联多条神经环路,BCI 难以同时记录,未能全面进行情绪调节^[40]。研究仅在干预前后进行评估,未能进行长期随访,远期疗效尚不确定^[61]。

在 BCI 的发展应用过程中,护理需联合医、工等多个学科,共同构建治疗体系,以促进跨学科发展。首先,目前专业培训缺乏同质化方案,应制订统一的培训标准。护理人员应加强业务规范化培训,深入学习 BCI 技术的应用机制、操作流程和注意事项,保障患者的基本权益和脑电数据安全,为后续 BCI 技术临床发展做好准备。其次,护理人员应加强与医疗、康复人员的合作共同制订训练计划,观察实施落地过程中有无出现安全相关问题,及时讨论解决;同时,可参与开发更多成本经济效益较高的 BCI 护理设备,以便提高工作效率。此外,随着人工智能的快速发展,BCI 与人工智能的结合有望在“生物智能”与“数字智能”之间建立一个高带宽、高语义的转换通道。而 AI 模型的性能高度依赖于数据的质量。护理人员应把握时代风向标,掌握大语言模型应用方法,成为高质量神经数据的采集者与标注者,并在人机共生中担当临床安全与伦理守门人。在智慧病房“搬进”家庭的形势下,患者对机器的居家操作使用、远期康复效果等

问题也相继而出。护理人员应对患者开展针对性培训,提升患者自我管理能力和在此基础上进行长期随访,了解BCI技术应用的长期疗效。

6 小结

BCI作为融合神经科学、工程技术与人工智能的前沿交叉技术,在医疗领域逐渐兴起并展现出巨大应用潜能。护理人员在实施过程中的评估监测、心理护理、基础护理、健康教育、沟通协调方面均发挥着重要作用。然而,在实际应用中尚缺乏相关的准则规范,需不断加强患者安全教育、数据安全、护理人员专业能力培训等。护理人员应明确其角色定位,在后续研究中制订BCI技术的护理操作规范和管理策略并应用于临床,保障BCI技术的安全使用,助力患者恢复功能,改善其运动、认知、情感等相关结局。

参考文献:

- [1] 张慧峰,张莹,李忠海.脑机接口技术在脊髓损伤治疗中的前沿应用[J].中华骨与关节外科杂志,2025,18(9):818-825.
- [2] Gao X, Wang Y, Chen X, et al. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces [J]. Trends Cogn Sci, 2021, 25(8): 671-684.
- [3] Maiseli B, Abdalla A T, Massawe L V, et al. Brain-computer interface: trend, challenges, and threats [J]. Brain Inform, 2023, 10(1): 20.
- [4] Cruz M V, Jamal S, Sethuraman S C. A comprehensive survey of brain-computer interface technology in health care: research perspectives [J]. J Med Signals Sens, 2025, 15(6): 16.
- [5] 国家药监局工国教国中.七部门关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见[EB/OL](2025-08)[2025-12-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202508/content_7035603.htm.
- [6] Vidal J J. Toward direct brain-computer communication [J]. Annu Rev Biophys Bioeng, 1973, 2(1): 157-180.
- [7] Farwell L A, Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials [J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1988, 70(6): 510-523.
- [8] 首都医科大学.癫痫临床诊疗与研究[EB/OL]. [2025-12-15]. <https://ygch.ccmu.edu.cn/lczlyyjjz/0d942f02e3ca4bf98b08e8e01f41e923.htm>.
- [9] 冯茜宁.跨越脑机接口成果转化“死亡峡谷”[J].中国医院院长,2025,21(16):43-44.
- [10] 马珂,邓晓娟.脑机接口心想事成[N].海南日报,2026-02-05(A08).
- [11] 国家医疗保障局.我国首例执行政府指导价脑机接口手术在武汉实施[EB/OL]. (2025-12-05)[2025-12-15]. https://www.nhsa.gov.cn/art/2025/12/5/art_14_18951.html.
- [12] 郑金书,王明明,朱远,等.基于脑机交互技术的康复机器人对卒中后偏瘫康复治疗临床研究[J].中医外治杂志,2021,30(3):3-5.
- [13] 孙雪峰,王一丹,刘平,等.康复领域应用脑机接口技术的研究进展[J].中国医疗设备,2024,39(2):154-158.
- [14] 蔡楚杰,李四楠,刘天,等.运动想象脑机接口在脑卒中后上肢康复中的研究进展[J].中国康复医学杂志,2023,38(6):851-857.
- [15] Ma Y N, Karako K, Song P, et al. Integrative neurorehabilitation using brain-computer interface: from motor function to mental health after stroke [J]. Biosci Trends, 2025, 19(3): 243-251.
- [16] 潘家辉,张志航,张源霖,等.面向意识障碍患者的脑机接口技术及其应用[J].生物医学工程学杂志,2025,42(3):438-446.
- [17] Khorev V, Kurkin S, Badarin A, et al. Review on the use of brain computer interface rehabilitation methods for treating mental and neurological conditions [J]. J Integr Neurosci, 2024, 23(7): 125.
- [18] 罗锐,周弘,严子能,等.脑机接口在脊髓损伤中的应用现状及前景[J].华中科技大学学报(医学版),2025,54(3):423-427,457.
- [19] Saha S, Mamun K A, Ahmed K, et al. Progress in brain computer interface: challenges and opportunities [J]. Front Syst Neurosci, 2021, 15: 578875.
- [20] Kawala-Sterniuk A, Browarska N, Al-Bakri A, et al. Summary of over fifty years with brain-computer interfaces: a review [J]. Brain Sci, 2021, 11(1): 43.
- [21] 高泽,蔡振彬,吴宇轩,等.脑机接口在脊柱脊髓损伤康复中应用的研究进展[J].实用骨科杂志,2025,31(9):817-820.
- [22] 庞乐,白海军,李琳.脑机接口技术在老年运动康复中的应用研究进展[J].医学信息,2025,38(18):189-192.
- [23] 曹育育,薛雨航,杨恒源,等.人工智能增强的脑机接口伦理规范考量[J].生物医学工程学杂志,2025,42(5):1085-1091.
- [24] 顿华帅,郭航天,李洪艳,等.基于镜像疗法的脑机接口技术在脑卒中患者上肢功能康复中的应用[J].重庆医学,2023,52(18):2820-2824.
- [25] 蔡旭刚,王磊,王帆,等.融合语音和脑电的智慧病房控制系统[J].计算机系统应用,2021,30(11):71-81.
- [26] 杨玉娜.基于脑机接口的脑卒中患者语音交流看护系统研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
- [27] 张松志.基于脑机接口的护理床脑控方法研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- [28] 王湃,吉星星,王佳丽,等.基于深度学习与双视觉反馈的脑机接口护理床控制系统[J].生物医学工程学杂志,2025,42(5):1-9.
- [29] 杜勇.基于脑电控制的智能护理轮椅系统研究与设计[D].曲阜:曲阜师范大学,2019.
- [30] Wang A, Tian X, Jiang D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial [J]. Med, 2024, 5(6): 559-569. e554.
- [31] 刘璇,高玲,褚凤明,等.脑机接口联合上肢康复机器人对脑卒中患者上肢功能的影响[J].中国康复理论与实践,2025,31(6):703-710.

- [32] 郑杰, 吴邹仪, 王安桥, 等. 醒脑开窍针法联合脑机接口手部康复机器人治疗中风后手功能障碍的临床观察[J]. 赣南医学院学报, 2023, 43(1): 53-58, 71.
- [33] 胡义茜, 高天昊, 白玉龙, 等. 脑机接口联合多模态感知反馈训练对脑卒中后上肢功能恢复的探索性研究[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(11): 1457-1462.
- [34] 王艺纯, 李文文, 陈小刚. 神经康复中结合经颅电刺激的无创脑机接口研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2026, 43(1): 178-185, 192.
- [35] 梁文栋, 张荣, 郭晓辉, 等. 脑卒中患者上肢功能康复中基于镜像疗法的脑机接口技术的应用价值[J]. 中国医疗器械信息, 2025, 31(3): 123-125, 158.
- [36] Ma Z Z, Wu J J, Cao Z, et al. Motor imagery-based brain-computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients[J]. J Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1): 91.
- [37] Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface[J]. Nature, 2023, 618(7963): 126-133.
- [38] Cajigas I, Davis K C, Meschede-Krasa B, et al. Implantable brain-computer interface for neuroprosthetic-enabled volitional hand grasp restoration in spinal cord injury[J]. Brain Commun, 2021, 3(4): fcab248.
- [39] 吴立凡, 董继革, 黄富表. 脑机接口在脊髓损伤患者上肢功能康复中的研究进展[J]. 中国老年保健医学, 2024, 22(5): 11-16.
- [40] 王凤婷, 赖伊杰, 孙伯民. 情感脑机接口的发展现状与神经调控方法[J]. 上海医学, 2024, 47(6): 331-334.
- [41] 陈兆劼, 王国芳. 从读脑到调脑: 基于心理学视角的脑机接口神经调控应用与机制[J]. 心理科学进展, 2025, 33(10): 1745-1765.
- [42] 孙立彬. 脑机接口为抑郁症治疗带来新突破[N]. 中国高新技术产业导报, 2025-07-21(016).
- [43] Sellers K K, Cohen J L, Khambhati A N, et al. Closed-loop neurostimulation for the treatment of psychiatric disorders[J]. Neuropsychopharmacology, 2024, 49(1): 163-178.
- [44] Spataro R, Xu Y, Xu R, et al. How brain-computer interface technology may improve the diagnosis of the disorders of consciousness: a comparative study[J]. Front Neurosci, 2022, 16: 959339.
- [45] 李静雯, 王秀梅. 脑机接口技术在医疗领域的应用[J]. 信息通信技术与政策, 2021(2): 87-91.
- [46] Tsai P C, Akpan A, Tang K T, et al. Brain computer interfaces for cognitive enhancement in older people: challenges and applications: a systematic review[J]. BMC Geriatr, 2025, 25(1): 36.
- [47] 曲静, 方凯宁, 朱山童, 等. 基于多模态脑机接口的虚拟现实康复训练系统[J]. 系统仿真学报, 2026, 38(1): 125-135.
- [48] 许中好. 脑机接口技术赋能智慧养老的风险与规制[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2025, 27(4): 148-164.
- [49] Guan Z, Zhang X, Huang W, et al. A method for detecting depression in adolescence based on an affective brain-computer interface and resting-state electroencephalogram signals[J]. Neurosci Bull, 2025, 41(3): 434-448.
- [50] 陈佳丽, 董继革, 黄富表. 脑机接口治疗脑卒中上肢功能及大脑可塑性的研究进展[J]. 中国老年保健医学, 2023, 21(5): 22-26.
- [51] Abbott M N, Peck S L. Emerging ethical issues related to the use of brain-computer interfaces for patients with total locked-in syndrome[J]. Neuroethics, 2017, 10(2): 235-242.
- [52] 曹培立, 张刚利. 脑机接口技术治疗脑卒中后认知功能损害的研究进展[J]. 中华神经医学杂志, 2023, 22(7): 747-752.
- [53] Al-Taleb M K H, Purcell M, Fraser M, et al. Home used, patient self-managed, brain-computer interface for the management of central neuropathic pain post spinal cord injury: usability study[J]. J Neuroeng Rehabil, 2019, 16(1): 128.
- [54] 方丹灵, 董芳辉, 王音, 等. 脑机接口技术联合音乐干预对肘关节僵硬患者术后疼痛的影响[J]. 护理学杂志, 2025, 40(21): 6-11.
- [55] He Y, Tang Z, Sun G, et al. Effectiveness of a Mindfulness meditation App based on an electroencephalography-based brain-computer interface in radiofrequency catheter ablation for patients with atrial fibrillation: pilot randomized controlled trial[J]. JMIR Mhealth Uhealth, 2023, 11: e44855.
- [56] 中华医学会神经外科学分会. 植入式脑机接口临床应用路径管理中国专家共识(2026版)[J]. 中华神经医学杂志, 2026, 25(1): 2-10.
- [57] 中华人民共和国科学技术部. 脑机接口研究伦理指引[EB/OL]. (2024-02-02) [2025-12-16]. https://www.most.gov.cn/kjbgz/202402/t20240202_189582.html.
- [58] Klein E, Ojemann J. Informed consent in implantable BCI research: identification of research risks and recommendations for development of best practices[J]. J Neural Eng, 2016, 13(4): 043001.
- [59] 李筱永. 脑机接口技术临床应用中知情同意的法律规制[J]. 政法论丛, 2025(4): 140-154.
- [60] Remsik A B, van Kan P L E, Gloe S, et al. BCI-FES with multimodal feedback for motor recovery poststroke[J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16: 725715.
- [61] Lu R, Pang Z, Gao T, et al. Multisensory BCI promotes motor recovery via high-order network-mediated inter-hemispheric integration in chronic stroke[J]. BMC Med, 2025, 23(1): 380.