

# 基于脑电图的无创脑机接口技术在脑卒中后运动功能障碍中的应用进展

石明芳<sup>1</sup> 陈静<sup>2</sup> 林朝晖<sup>2</sup> 余倩<sup>1</sup> 丁晶<sup>2</sup>

<sup>1</sup>复旦大学附属中山医院康复医学科,上海 200032;<sup>2</sup>复旦大学附属中山医院神经内科,上海 200032

通信作者:丁晶,Email: ding.jing@zs-hospital.sh.cn

**【摘要】** 近年来,脑机接口作为一种新兴技术,逐渐被应用于神经系统疾病的治疗中,特别是在脑卒中后偏瘫肢体运动功能康复中表现出巨大潜能。基于头皮脑电的无创脑机接口通过采集脑电信号,经数据处理、解码,进而控制外部设备,实现了大脑和外界交互的闭环通路。随着技术发展成熟,脑机接口的临床应用范式多种多样,在脑卒中后肢体运动障碍中的应用涵盖外骨骼机器人、功能性电刺激、虚拟现实设备甚至多模态反馈系统,其疗效得到一定程度验证。未来,脑机接口技术应聚焦于加强技术支撑,提升信号采集的精度和准确度、实现精准输出,才能真正实现靶向调控、脑机双向交互融合。

**【关键词】** 卒中; 无创脑机接口; 运动障碍; 脑电图; 近红外脑功能成像

**基金项目:** 申康市级医院诊疗技术推广及优化管理项目(SHDC22022304)

在全球范围内,脑卒中的发生是增加国家病死率的三大疾病之一<sup>[1]</sup>。脑卒中致残率高,存活的患者会遗留不同程度运动功能障碍,即肌肉控制或运动功能的丧失、受限,或是活动受限。长期损伤、活动限制(残疾)和参与受限(残障)给患者及其家庭带来巨大的生理和心理负担。目前脑卒中后运动功能障碍的治疗主要包括神经生理学方法、双侧训练、强制性运动疗法、肌电生物反馈、心理干预、重复性任务训练、康复机器人、夹板和矫形器等<sup>[2]</sup>。虽然借助目前康复治疗手段能使患者肢体偏瘫得到一定改善,但多数患者在病后3~6个月恢复程度逐渐减慢并逐渐进入平台期,脑卒中后的神经功能完全恢复仍是临床的难解之题<sup>[3]</sup>。

神经调控技术、脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术、人工智能是国际脑科学研究最前沿的重要工具,BCI是在大脑与外部设备之间创建信息通道,实现二者之间直接信息交互的新型交叉技术,受到越来越多国家及研究机构的关注及重视,也在近年来得到了从原理支撑到技术研发的极大进步,其在神经系统相关疾病的康复中亦开始展现出独具一格的优势。

## 一、BCI概述

BCI通过记录装置采集颅内或脑外的大脑神经活动,利用机器学习模型等对神经活动进行解码,解析出神经活动中蕴含的主观意图等信息,基于这些信息输出相应的指令,操控外部装置实现与人类主观意愿一致的行为,以替代、修复、增强、补充或改善人体大脑中枢神经的正常输出,并接收来自外部设备的反馈信号,从而构成中枢神经与外界交互的闭环系统<sup>[4]</sup>。

一个典型的BCI系统主要包含4个组成部分:信号采集部分、信号处理部分、控制设备部分和反馈环节。按照信号采集方式,BCI分为侵入式、半侵入式和非侵入式,侵入式BCI将采集电极、芯片或探针植入大脑颅腔的灰质中,其信号采集包括立体定向脑电图(electroencephalogram, EEG)、微电极记录和深部脑刺激。侵入式BCI手术创伤大、存在感染等一系列风险,但其通过电极阵列与目标脑区的神经元细胞直接接触,可实现高带宽、高质量脑电信号的传递。半侵入式BCI将探测传感器电极植入至硬膜的上方或者下方,或植入到大脑皮质表面但不侵入到神经元中,其信号采集主要是基于皮质EEG。非侵入式BCI是指在颅外对脑信

DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240630-01464

收稿日期 2024-06-30 本文编辑 朱瑶

引用本文:石明芳,陈静,林朝晖,等.基于脑电图的无创脑机接口技术在脑卒中后运动功能障碍中的应用进展[J].中华医学杂志,2024,104(46):4274-4278. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240630-01464.



号进行检测,手段包括 EEG、脑磁图(magnetoencephalogram, MEG)、功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS),能记录脑部大范围、低空间精度的状态变化,无需手术即可实现脑机打字、运动想象等应用<sup>[5]</sup>。BCI 通过研究结合电、磁、超声、光学和其他物理技术,在不同层次上与大脑进行交互,促进脑卒中等神经损伤患者的运动、言语或认知等神经功能的恢复,或通过人机融合获得机器辅助的运动与通讯交流功能。非侵入式 BCI 获得的信噪比较低、精确性较侵入式差,但具有损伤小、简便快捷等优势,临床应用范围更广。

信号处理是 BCI 的核心部分,其通过对 EEG 采集到的信号进行编码、预处理、特征提取、分类等算法的组合处理,将信号变为数字命令,从而对大脑活动状态或意图解码,并将大脑活动状态、解码结果、与外界通信或控制结果反馈给用户,进而调节其大脑活动。

BCI 打破了传统康复治疗单纯中枢或外周神经、肌肉刺激手段,实现了人脑与外界的直接信息连接,成为解决瘫痪、卒中、帕金森等患者神经功能受损的有效手段。通过靶向性的生理、物理、心理刺激神经系统,基于 EEG 的 BCI 技术可能能够通过诱导大脑活动特征的变化,改变神经可塑性,进而促进运动功能的恢复<sup>[6-7]</sup>。

## 二、EEG-无创 BCI 在脑卒中的应用范式

基于 EEG 的无创 BCI 信号分为自发脑电和诱发脑电,自发脑电是在没有外部刺激的情况下记录的脑电信号,是大脑神经元自发活动的结果,反映了大脑当前的状态和功能。内源性脑电信号的产生包括运动执行、运动想象(motor imagery, MI)和其他心理任务,例如视觉想象、MI、心算和推理等。诱发脑电是在受到外部刺激后产生的脑电信号,作为对特定刺激的反应而出现的电位变化,其中外部刺激可以是基于视觉的、听觉的、体感的。外源性刺激产生事件相关电位(event related potential, ERP)、稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SSVEP)等,反映了对特定刺激的注视、注意和认知加工等过程。

2008 年 *Lancet Neurology* 杂志文章论述了基于 EEG 的 BCI 技术可能能够通过诱导大脑活动特征的变化,改变神经可塑性,进而促进运动功能的恢复<sup>[8]</sup>。至今 BCI 技术逐步发展成熟,目前在脑卒中后运动功能障碍中的临床应用范式主要包括 MI、ERP、SSVEP、混合 BCI 范式等。

1. MI 范式:可细分为感觉运动节律(sensorimotor rhythm, SMR)<sup>[9]</sup>和想象身体运动(imagined body kinematics, IBK)范式<sup>[10]</sup>。在 SMR 范式中,运动想象导致  $\mu$  节律(8~12 Hz)和  $\beta$  节律(18~26 Hz)中的事件相关去同步化(event-related desynchronization, ERD)和放松状态时产生事件相关的同步(event related synchronization, ERS),通过调制脑电信号可实现对患者动作意图的传达并借助 BCI 实现外界交互<sup>[11]</sup>。

2. ERP:是 BCI 中常用的控制信号,通过 ERP 控制 BCI 能够对用户的任务相关神经活动提供在线反馈<sup>[12]</sup>。其中

P300 在 BCI 中运用较为广泛,通过向患者提供一系列刺激并记录大脑对刺激产生的 EEG 信号,与注意力和认知相关的 P300 部分通常被用来控制外部设备<sup>[13]</sup>。

3. SSVEP:是视觉皮质以特定频率重复视网膜输入后产生的持续反应,通过分析检测脑电信号谱峰处对应的频率,即能检测到受试者视觉注视的刺激源,从而识别受试者的意图<sup>[14]</sup>。基于 SSVEP 和 P300 的系统主要特点是无需训练,这类系统比较适合用于多指令选择的离散控制型应用,如打字系统、操作界面等<sup>[13, 15-16]</sup>。

4. 混合 BCI 范式:包括 P300+SSVEP<sup>[17]</sup>, MI+SSVEP 等<sup>[18-19]</sup>,通过增加系统模态来提升系统性能,避免多种采集设备间的同步性和兼容问题。以及同其他非 EEG 的范式相结合,如眼电图(electrooculography, EOG)<sup>[20]</sup>、MEG<sup>[21]</sup>、肌电图(electromyography, EMG)<sup>[22]</sup>、功能磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等<sup>[23-24]</sup>,通过多种大脑模式和多感觉刺激提高目标检测性能,实现多维功能控制和执行。

## 三、EEG-无创 BCI 在改善脑卒中后肢体运动障碍中的应用

在神经系统受到创伤(如脑卒中、脊髓损伤)后,通过靶向性的生理、物理、心理刺激神经系统,帮助损伤环路再生或建立新的环路,恢复神经网络的正常功能,这是脑疾病和脑创伤康复医疗的主要目标。

2011 年 Ang 等<sup>[25]</sup>收集了 54 例脑卒中患者进行 BCI 训练时的脑电数据,对比健康受试者休息背景的 EEG 离线准确性,结果显示两组间平均离线精度无显著差别,提示大多数脑卒中患者可以使用基于 EEG 的运动想象 BCI。目前 BCI 技术在脑卒中运动康复中的应用已经不再局限于单纯进行运动想象或运动尝试,临床研究中基于 BCI 模式联合外骨骼机器人、功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)、视觉反馈训练和多模态反馈训练等方式,通过综合手段来改善偏瘫肢体功能、步态、精细协调能力和日常生活自理能力。

1. BCI 联合外骨骼机器人:单纯的外骨骼装置仅能带动肢体助-被动运动,而 BCI 系统实现了人机交互。目前基于 EEG-BCI 控制的机器人外骨骼多集中在手、腕、肘部运动<sup>[26]</sup>,通过视、听觉和外骨骼运动刺激/力反馈产生神经反馈,在提高 BCI 系统训练的有效性的同时,能够促进脑卒中患者上肢和手功能的康复。Guo 等<sup>[27]</sup>对卒中后患者进行为期 2 周、基于 SSVEP-BCI 控制的柔性机器人手套训练后,试验组 FMA 和 Wolf 运动功能量表评分较常规康复组和传统机器人组均有显著改善,且 FMA 的改善与 BCI 准确度显著相关,验证了该设备在脑卒中后手功能康复中的可行性。

通过对不同模式下在线受试者脑电信号分析显示,BCI 和机器人外骨骼主动反馈模式的结合可最大化激活脑有效网络连接<sup>[28]</sup>。通过获取患者脑电信号控制机器人外骨骼,予反馈刺激带动患肢运动,增加了患者在康复训练过程中的参与度,运动相关皮质电位信号表明显示患者的主动参

与同手功能恢复呈正相关<sup>[29]</sup>。在 Yuan 等<sup>[30]</sup>和 Lau 等<sup>[31]</sup>对卒中后患者进行 BCI-机械手训练 20 次后发现,干预后和随访 6 个月后患者 FMA、手臂动作调查测试改善同基线相比具有显著性差异,且 BCI 机械手训练能达到长期的运动功能改善;fMRI 上半球两侧运动区之间功能连接显著上调。其研究还发现,运动功能的改善以及同侧 M1 和对侧运动前区之间的功能改变与同侧皮质脊髓束完整性显著相关。

2. BCI 联合 FES: FES 能引起功能性运动并传递本体感觉和体感信息,特别是通过大量募集高尔基肌腱器官和肌纺锤体反馈回路。临床试验证明,BCI 系统与 FES 联合可显著增强患者的肢体运动功能恢复。Biasiucci 等<sup>[32]</sup>对比 BCI-FES 系统和单纯电刺激在慢性卒中患者上肢运动功能康复的效果,结果显示 BCI-FES 组患者在干预后表现出明显的功能恢复,且疗效持续 6~12 个月;干预组脑电图  $\mu$  (10~12 Hz) 和  $\beta$  (18~24 Hz) 频段有效连通性显著增加,受影响半球运动区域之间功能连接的增加与功能改善显著相关。Kim 等<sup>[33]</sup>通过 EEG-BCI 系统触发 FES 作用于偏瘫患者上肢腕伸肌,训练 4 周后患者 FMA、运动活动日志、改良 Barthel 指数和腕关节屈曲幅度显著高于常规康复组。

Lee 等<sup>[34]</sup>通过运动观察(action observation, AO)触发 BCI-FES 训练系统用于卒中后患者,试验组 FMA 等运动功能评分及 EEG  $\alpha$  功率、 $\beta$  功率、密度和激活同单纯 FES 刺激组相比差异均有统计学意义。运动功能的改善表明以 AO-BCI 为基础的 FES 能够增强偏瘫上肢运动功能和促进皮质激活,可以作为脑卒中康复的治疗工具。通过 AO 和 FES 对皮质脊髓产生协同激活,其可能通路包括皮质脊髓运动神经元、镜像神经元系统(MNS)和奖励学习脑网络等的重叠<sup>[35]</sup>。

3. BCI 联合虚拟现实(virtual reality, VR)设备:VR 通过计算机仿真系统模拟外界环境,提供视觉和听觉刺激来创造人类体验,最广泛使用的 VR 系统使用头戴式显示器、加速器和扬声器作为三维环境生成的基础,利用计算机以仿真的方式充分结合现实环境为患者创造实时反应、实体对象变化与相互作用的三维虚拟世界。在 VR 环境下进行脑机交互,有助于提升被试的沉浸感,可提升运动障碍患者的康复训练效果<sup>[36]</sup>。

邵谢宁等<sup>[37]</sup>在 VR 场景的任务引导患者运动想象并通过 BCI 进行人机交互,同时结合触觉反馈进一步增强患者的本体感觉,患者在训练后运动脑区明显激活,且该区域高  $\gamma$  频段功率谱密度显著增加。Lima 等<sup>[38]</sup>将经颅直流电刺激结合 BCI 技术,通过 VR 激活运动想象以控制足部电动踏板设备,患者经过为期 3 周的训练后下肢运动功能、协调性、步速及感觉功能均有进步。此外,国内外多项研究将 BCI 同虚拟场景结合,在认知障碍的诊断及改善患者注意力水平、执行功能等方面也有一定疗效<sup>[39-41]</sup>。

目前 VR 技术已经不再局限于交互式图像和声音,表皮 VR 设备还可提供皮肤触感及肌肉振动将机械振动同听觉、视觉刺激结合<sup>[42]</sup>。通过 BCI 创建同步闭环康复系统,模拟

产生三维空间的虚拟场景,结合 VR 设备向用户进行多重反馈响应和互动,在未来将为残疾、残障患者的康复医疗和居家生活提供更多可能。

4. BCI 联合多模态反馈训练:多模态 BCI 系统(multi-modal brain-computer interface, MM-BCI)采用至少两种试验范式、多种感觉刺激或结合多种信号采集方式(如 EEG 和 fMRI、EEG 和近红外脑功能成像),通过提供多样化大脑信息进行融合互补,能够有效提高识别目标的精度,在脑卒中后功能训练的应用中发挥协同治疗效应。

在 Kim 等<sup>[35]</sup>的研究中,通过联合运动观察和 BCI 技术,由视觉反馈和 BCI 控制外周电刺激(peripheral electrical stimulation, PES)反馈,随机顺序进行 AO、AO+PES、BCI-AO+cPES(持续性 PES)、BCI-AO+iPES(触发式 PES)试验,结果显示健康受试者和脑卒中后患者均表现出运动诱发电位的潜伏期缩短、波幅增加,推断通过 AO-BCI+PES 能够诱导皮质脊髓兴奋性。通过运动观察的同时进行视觉反馈和电刺激,BCI 系统可以有效地同步最高皮质激活和外周刺激,从而促进联想学习。使用 BCI 进行脑状态依赖性刺激,将 PES 与运动启动配对,可诱导与任务相关的皮质可塑性的长期增加。Tsuchimoto 等<sup>[43]</sup>将 MI、机器人辅助和手部神经肌肉电刺激相结合,fMRI 显示神经反馈干预期间,同侧感觉运动皮质静息态功能连接增加,感觉和运动皮质协同激活增强。

虽然 BCI 机器人在下肢解码性能方面尚未得到充分优化,但 BCI 联合外周电刺激、VR 设备等同样被探索用于脑卒中后下肢功能恢复及步态改善<sup>[44-46]</sup>。Chung 等<sup>[47]</sup>通过视觉注意信号(SMR+ $\beta$ )/ $\theta$  触发 FES 作用于患侧胫骨前肌,训练后 BCI-FES 组步速、步频、健侧步长同单纯 FES 刺激相比均有显著差异性改善。

#### 四、问题与展望

脑卒中后患者的康复预后依赖于有效而精准的康复治疗手段,BCI 技术通过提高神经可塑性来恢复运动进而改善卒中患者的生活质量,在运动康复中表现出巨大潜能。突破脑-机单向的信息流而转向脑机双向交互-融合,实现认知能力增强和自我功能调节,这将在卒中后肢体运动功能和大脑功能连接的调节上发挥重要作用。

未来非侵入式 BCI 需要进一步提高信号采集的时空精度,抑制环境噪声干扰,提高可靠性和精确度,实现精准的神经靶向调控,同时力求设备小型化、无线便捷性,才能为人脑控制器件和调控人脑状态提供广泛应用场景。实现工程 BCI 向临床应用的跨越仍面临着诸多挑战,在理论基础、技术支撑、临床康复应用、道德实践考量等方面还有诸多需考虑解决的问题。

**利益冲突** 所有作者声明不存在利益冲突

#### 参 考 文 献

[1] Global, regional, and national disability-adjusted



- life-years (DALYs) for 333 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE) for 195 countries and territories, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016[J]. *Lancet*, 2017, 390(10100): 1260-1344. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)32130-X.
- [2] Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review[J]. *Lancet Neurol*, 2009, 8(8): 741-754. DOI: 10.1016/S1474-4422(09)70150-4.
- [3] Preston E, Ada L, Stanton R, et al. Prediction of independent walking in people who are nonambulatory early after stroke: a systematic review[J]. *Stroke*, 2021, 52(10): 3217-3224. DOI: 10.1161/STROKEAHA.120.032345.
- [4] 国家科技伦理委员会人工智能伦理分委员会. 脑机接口研究伦理指引[Z]. 2023.
- [5] Zhang X, Yao L, Wang X, et al. A survey on deep learning-based non-invasive brain signals: recent advances and new frontiers[J]. *J Neural Eng*, 2021, 18(3). DOI: 10.1088/1741-2552/abc902.
- [6] Krueger J, Krauth R, Reichert C, et al. Hebbian plasticity induced by temporally coincident BCI enhances post-stroke motor recovery[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 18700. DOI: 10.1038/s41598-024-69037-8.
- [7] Chen C, Yuan K, Wang X, et al. Neural correlates of motor recovery after robot-assisted training in chronic stroke: a multimodal neuroimaging study[J]. *Neural Plast*, 2021, 2021:8866613. DOI: 10.1155/2021/8866613.
- [8] Daly JJ, Wolpaw JR. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation[J]. *Lancet Neurol*, 2008, 7(11): 1032-1043. DOI: 10.1016/S1474-4422(08)70223-0.
- [9] Pérez-Velasco S, Marcos-Martínez D, Santamaría-Vázquez E, et al. Unraveling motor imagery brain patterns using explainable artificial intelligence based on Shapley values [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2024, 246: 108048. DOI: 10.1016/j.cmpb.2024.108048.
- [10] Borhani S, Kilmarx J, Saffo D, et al. Optimizing prediction model for a noninvasive brain-computer interface platform using channel selection, classification, and regression[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2019, 23(6): 2475-2482. DOI: 10.1109/JBHI.2019.2892379.
- [11] Horowitz AJ, Guger C, Korostenskaja M. What internal variables affect sensorimotor rhythm brain-computer interface (SMR-BCI) performance? [J]. *HCA Healthc J Med*, 2021, 2(3):163-179. DOI: 10.36518/2689-0216.1196.
- [12] Novičić M, Savić AM. Somatosensory event-related potential as an electrophysiological correlate of endogenous spatial tactile attention: prospects for electrotactile brain-computer interface for sensory training[J]. *Brain Sci*, 2023, 13(5): 766. DOI: 10.3390/brainsci13050766.
- [13] Ron-Angevin R, Garcia L, Fernández-Rodríguez Á, et al. Impact of speller size on a visual P300 brain-computer interface (BCI) system under two conditions of constraint for eye movement[J]. *Comput Intell Neurosci*, 2019, 2019: 7876248. DOI: 10.1155/2019/7876248.
- [14] Albahri AS, Al-Qaysi ZT, Alzubaidi L, et al. A systematic review of using deep learning technology in the steady-state visually evoked potential-based brain-computer interface applications: current trends and future trust methodology[J]. *Int J Telemed Appl*, 2023, 2023:7741735. DOI: 10.1155/2023/7741735.
- [15] Pires G, Barbosa S, Nunes UJ, et al. Visuo-auditory stimuli with semantic, temporal and spatial congruence for a P300-based BCI: an exploratory test with an ALS patient in a completely locked-in state[J]. *J Neurosci Methods*, 2022, 379: 109661. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2022.109661.
- [16] Orban M, Elsamanty M, Guo K, et al. A review of brain activity and EEG-based brain-computer interfaces for rehabilitation application[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2022, 9(12):768. DOI: 10.3390/bioengineering9120768.
- [17] 韩锦, 董博文, 刘邈, 等. 基于 P300/SSVEP 的双人协同脑控机械臂汉字书写系统[J]. *数据采集与处理*, 2022, 37(6): 1401-1411. DOI: 10.16337/j.1004-9037.2022.06.020.
- [18] 刘迎欣, 李明, 于扬, 等. 混合脑机接口在人机交互领域的应用综述[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(12):2077-2089. DOI: 10.7641/CTA.2023.30237.
- [19] Pan J, Chen X, Ban N, et al. Advances in P300 brain-computer interface spellers: toward paradigm design and performance evaluation[J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 1077717. DOI: 10.3389/fnhum.2022.1077717.
- [20] Belkhiria C, Boudir A, Hurter C, et al. EOG-based human-computer interface: 2000-2020 review[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(13):4914. DOI: 10.3390/s22134914.
- [21] Yeom HG, Kim JS, Chung CK. A magnetoencephalography dataset during three-dimensional reaching movements for brain-computer interfaces[J]. *Sci Data*, 2023, 10(1): 552. DOI: 10.1038/s41597-023-02454-y.
- [22] Cui H, Chi X, Wang L, et al. A high-rate hybrid BCI system based on high-frequency SSVEP and sEMG[J]. *IEEE J Biomed Health Inform*, 2023, 27(12): 5688-5698. DOI: 10.1109/JBHI.2023.3321722.
- [23] Chai X, Cao T, He Q, et al. Brain-computer interface digital prescription for neurological disorders[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2024, 30(2):e14615. DOI: 10.1111/cns.14615.
- [24] Fleury M, Figueiredo P, Vourvopoulos A, et al. Two is better? Combining EEG and fMRI for BCI and neurofeedback: a systematic review[J]. *J Neural Eng*, 2023, 20(5). DOI: 10.1088/1741-2552/ad06e1.
- [25] Ang KK, Guan C, Chua KS, et al. A large clinical study on the ability of stroke patients to use an EEG-based motor imagery brain-computer interface[J]. *Clin EEG Neurosci*, 2011, 42(4):253-258. DOI: 10.1177/155005941104200411.
- [26] Sarhan SM, Al-Faiz MZ, Takhakh AM. A review on EMG/EEG based control scheme of upper limb rehabilitation robots for stroke patients[J]. *Heliyon*, 2023, 9(8):e18308. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18308.
- [27] Guo N, Wang X, Duanmu D, et al. SSVEP-based brain computer interface controlled soft robotic glove for post-stroke hand function rehabilitation[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2022, 30: 1737-1744. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3185262.
- [28] 罗维. 基于运动想象脑机接口的上肢外骨骼康复系统研究[D]. 中国医学科学院; 清华大学医学部; 北京协和医学院生物医学工程, 2022.
- [29] Said RR, Heyat M, Song K, et al. A systematic review of virtual reality and robot therapy as recent rehabilitation technologies using EEG-brain-computer interface based on movement-related cortical potentials[J]. *Biosensors (Basel)*, 2022, 12(12):1134. DOI: 10.3390/bios12121134.
- [30] Yuan K, Wang X, Chen C, et al. Interhemispheric functional

- reorganization and its structural base after BCI-guided upper-limb training in chronic stroke[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(11): 2525-2536. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3027955.
- [31] Lau C, Yuan K, Wong P, et al. Modulation of functional connectivity and low-frequency fluctuations after brain-computer interface-guided robot hand training in chronic stroke: a 6-month follow-up study[J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 611064. DOI: 10.3389/fnhum.2020.611064.
- [32] 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. DOI: 10.1038/s41467-018-04673-z.
- [33] Kim T, Kim S, Lee B. Effects of action observational training plus brain-computer interface-based functional electrical stimulation on paretic arm motor recovery in patient with stroke: a randomized controlled trial[J]. *Occup Ther Int*, 2016, 23(1): 39-47. DOI: 10.1002/oti.1403.
- [34] Lee SH, Kim SS, Lee BH. Action observation training and brain-computer interface controlled functional electrical stimulation enhance upper extremity performance and cortical activation in patients with stroke: a randomized controlled trial[J]. *Physiother Theory Pract*, 2022, 38(9): 1126-1134. DOI: 10.1080/09593985.2020.1831114.
- [35] Kim MG, Lim H, Lee HS, et al. Brain-computer interface-based action observation combined with peripheral electrical stimulation enhances corticospinal excitability in healthy subjects and stroke patients[J]. *J Neural Eng*, 2022, 19(3). DOI: 10.1088/1741-2552/ac76e0.
- [36] 田杰铭,程时伟.VR环境下运动想象脑电分类算法及脑机交互应用[J]. *小型微型计算机系统*, 2022, 43(10): 2070-2077. DOI: 10.20009/j.cnki.21-1106/TP.2022-0311.
- [37] 邵谢宁,张艺滢,张栋,等.融合多感官刺激的虚拟现实—脑机接口手功能增强康复系统[J]. *生物医学工程学杂志*, 2024, 41(4): 656-663. DOI: 10.7507/1001-5515.202312055.
- [38] Lima J, Silva LA, Delisle-Rodriguez D, et al. Unraveling transformative effects after tDCS and BCI intervention in chronic post-stroke patient rehabilitation-an alternative treatment design study[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(23): 9302. DOI: 10.3390/s23239302.
- [39] 郝明宸.基于BCI-VR的注意力水平训练与评估系统研究[D].燕山大学,2023.
- [40] 张景浩.基于BCI-VR的认知障碍患者空间认知训练系统与评估方法研究[D].燕山大学,2023.
- [41] Yao Y, Hasan W, Jiao W, et al. ChatGPT and BCI-VR: a new integrated diagnostic and therapeutic perspective for the accurate diagnosis and personalized treatment of mild cognitive impairment[J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18: 1426055. DOI: 10.3389/fnhum.2024.1426055.
- [42] Yu X, Xie Z, Yu Y, et al. Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality[J]. *Nature*, 2019, 575(7783): 473-479. DOI: 10.1038/s41586-019-1687-0.
- [43] Tsuchimoto S, Shindo K, Hotta F, et al. Sensorimotor connectivity after motor exercise with neurofeedback in post-stroke patients with hemiplegia[J]. *Neuroscience*, 2019, 416: 109-125. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2019.07.037.
- [44] Niazi IK, Navid MS, Rashid U, et al. Associative cued asynchronous BCI induces cortical plasticity in stroke patients[J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2022, 9(5): 722-733. DOI: 10.1002/acn3.51551.
- [45] Ren S, Wang W, Hou ZG, et al. Enhanced motor imagery based brain-computer interface via FES and VR for lower limbs[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28(8): 1846-1855. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3001990.
- [46] 中华医学会神经外科学分会,中国卒中学会脑血管外科分会.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[J]. *中华医学杂志*, 2024, 104(23): 2105-2112. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240326-00690.
- [47] Chung E, Lee BH, Hwang S. Therapeutic effects of brain-computer interface-controlled functional electrical stimulation training on balance and gait performance for stroke: a pilot randomized controlled trial[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2020, 99(51): e22612. DOI: 10.1097/MD.00000000000022612.

