

基于脑机接口的康复训练在脑卒中上肢康复中的研究进展

李丹^{1,2}, 刘玲玉², 靳令经², 王茹¹

【关键词】 脑卒中; 脑机接口; 上肢; 运动功能; 康复

【中图分类号】 R49; R743.3 【DOI】 10.3870/zgkf.2023.10.009

2019年全球疾病负担数据显示,脑卒中是我国乃至全球成人致死、致残的主要原因^[1-2]。脑卒中患者常遗留肢体运动功能障碍^[3],73%~88%的首次脑卒中患者和55%~75%的慢性脑卒中患者可遗留上肢运动障碍^[4-5],尽管物理治疗、强制性运动疗法等多种康复治疗技术已经应用于脑卒中上肢功能康复,仍有约20%~30%的患者不适用这些康复策略^[6]。因此,探索新的、有效的康复训练方法至关重要。脑机接口(brain-computer interface, BCI)可以通过获取大脑神经活动进而控制外部设备,外部设备也会相应地给大脑发送反馈信息,实现大脑意图和实际行动之间的双向联系。这个过程由信号采集、信号处理和交互控制三个模块组成^[7]。基于运动想象(motor imagery, MI)的BCI是最流行的BCI范式^[8]。近年来,基于BCI的多种康复训练系统在脑卒中后上肢康复领域发展迅速,本文将基于BCI的不同训练系统在脑卒中上肢功能康复中的应用及机制研究进展进行概述。

1 BCI系统

BCI系统利用用户的大脑活动信号作为人和环境之间通信的媒介,使受试者能够通过大脑活动操作外部设备,不受周围神经或肌肉的控制。按照信号采集的位置,把BCI系统分为侵入式BCI和非侵入式BCI。虽然前者采集的脑信号精确度更高和信噪比均更高,但是鉴于其存在创伤感染、异物反应及生成瘢痕等风险和伦理问题^[9],因此非侵入式BCI仍然是首选。按照信号采集的方式,可分为脑电图、脑磁图、近红外光谱技术和功能性核磁共振成像等,其中脑电图是最常见的信号采集方式。MI、事件相关电位P300、稳态视

觉诱发电位(steady-state visual evoked potential, SS-VEP)是脑电图常见的信号来源^[10],它们构成了不同的BCI范式。我们有必要了解基于脑电图的三种BCI范式的原理和各自的优、缺点。①MI-BCI:原理,通过提取想象不同肢体部位运动时运动皮质节律信号的变化特征以控制外部设备;优势,控制信号属于自主诱发脑电,而无需外界特定刺激;劣势,需要较多训练学习控制大脑节律;指令集有限;分类速率和正确率有待提高;个体差异性较大。②P300-BCI:原理,P300由刺激诱发的潜伏期约300ms的晚期正波,与注意等认知功能有关;优势,训练难度低;系统稳定可靠;信息正确率较高;适合严重残疾患者独立长期在家庭环境中使用;劣势,对于眼部肌肉控制有障碍人群受限;注意力和视觉高度集中易引起疲劳感;幅值低而难以检测。③SS-VEP-BCI:原理,通过快速重复刺激诱发脑电地稳定振荡;优势,信息传输率较高;输出指令集丰富;训练难度低;劣势,快速重复的视觉刺激易引发视觉疲劳;对于眼部肌肉控制有障碍人群受限;依赖刺激源。近几年,随着BCI技术的迅速发展,基于脑电图的混合BCI范式也成为了研究热点。Yu等^[11]将MI和SSVEP相结合的混合BCI范式中,SSVEP可以为MI提供有效的持续反馈,从而更有效地识别受试者的意图。Zuo等^[12]鉴于SSVEP易引发视觉疲劳,提出了一种将P300和MI结合的混合BCI,不仅可以使被试通过更柔和的刺激来有效地调节感觉运动节律,还可以通过P300提高BCI训练初始阶段的反馈准确性。

2 基于BCI模式的训练在脑卒中后上肢康复中的应用

BCI常与不同外部设备联合进行训练,通过采集脑电信号、计算机处理解码患者意图,将信息转换为有效的命令信号输出至外部设备,外部设备执行指令并提供本体感觉反馈或视觉反馈,形成主动式闭环反馈回路帮助患者调节神经活动,从而促进神经可塑性和肢体运动功能恢复^[13]。目前常用的外部设备有功能

基金项目:国家自然科学基金(82230084)

收稿日期:2022-09-26

作者单位:1. 上海体育大学,上海 200438;2. 同济大学附属养志康复医院(上海市阳光康复中心)神经康复科,上海 201619

作者简介:李丹(2000-),女,在读硕士,主要从事脑机接口及神经康复方面的研究。

通讯作者:王茹, wangru0612@163.com

性电刺激(functional electrical stimulation, FES)、上肢康复机器人和视觉反馈设备。

2.1 基于BCI模式的FES训练 FES应用一定强度的低频脉冲电流,按需编定程序,作用于神经肌肉系统,以产生运动或模仿正常自主运动,从而补偿或替代受损个体已丧失的功能^[14]。Jang等^[15]对脑卒中患者肩关节半脱位处进行BCI-FES或FES治疗共30次,每次20min,持续6周;电刺激时间为15s,频率35Hz,强度1~50mA。结果表明,BCI-FES训练比单独FES训练更有助于改善脑卒中后的肩关节半脱位,并改善肩部的屈曲和外展活动。Biasiucci等^[16]对27例严重手部瘫痪的脑卒中患者进行BCI-FES训练(试验组)对照组采用假刺激干预,每周2次,每次60min,持续5周;FES电流强度10~25mA,频率16~30Hz。训练后,试验组上肢Fugl-Meyer评定量表(Fugl-Meyer assessment, FMA)评分明显高于对照组,并且效果能维持至训练结束后6~12个月,这表明BCI与FES联合训练能更加有效改善慢性脑卒中患者的上肢运动功能。Tabernig等^[17]对8例脑卒中患者进行BCI-FES训练,每周4次,每次60min;FES产生最大强度为40mA、频率为2.5pps、持续0.2ms的双向矩形脉冲电流。训练后患者上肢FMA评分显著提高,痉挛、肘关节和腕关节主动屈曲活动度和生活质量均有所改善。

2.2 基于BCI模式的上肢康复机器人训练 上肢康复机器人是交互式电动设备,分为外骨骼和末端执行器两种构型,前者通过控制每个节段的外骨骼位移来辅助肢体运动的,后者从远端应用点移动肢体^[18-20]。上肢康复机器人可提供重复、高强度和特定任务训练,刺激、重新激活和整合参与运动回路的体感系统输入,促进感觉运动重组,对精细动作的康复有较好的效果^[21-22]。BCI先将患者的大脑神经活动转化为上肢机器人的动作输出,驱动或辅助患者执行规范的动作,同时上肢机器人也受到患者的直接控制^[23-24]。2014年Ang等^[25]报道了136次基于BCI的外骨骼反馈训练可以获得与传统机器人训练1040次相似的恢复效果,表明了BCI机器人训练的价值。在Frolov等^[26]的一项多中心随机对照研究中,试验组55例脑卒中患者接受BCI控制的手部外骨骼主动训练,对照组19例患者仅接受手部外骨骼被动训练,两组都接受常规物理治疗,共训练10次,每次30min。结果显示,2组的上肢FMA结果和上肢动作研究量表(action research arm test, ARAT)结果均有改善,但对照组中的抓、捏和粗大动作得分无显著改善,且试验组FMA和ARAT结果改善达到最小临床重要差异患者的比

例分别比对照组高4.3倍和2.3倍。Bhagat等^[27]对10名脑卒中患者肘关节处进行BCI控制的动力外骨骼训练,每周3次,持续4周。训练后上肢FMA和ARAT评分显著提高,患者动作的速度和流畅性改善。Chen等^[28]把14例脑卒中患者随机分为BCI组和对照组,发现BCI组干预前后的改善率(12.77%)高于对照组(7.14%),BCI组运动恢复良好的患者(57.1%)也多于对照组(28.6%)。Ramos等^[29]和Cheng等^[30]都认为对具有上肢功能障碍的脑卒中患者进行BCI控制机器人干预,可使患者获得持久的上肢功能改善。Guo等^[31]探究了基于SSVEP的BCI控制机器人对脑卒中后上肢康复的疗效,将30例脑卒中后患者随机平均分为3组,分别接受常规治疗、机器人治疗和BCI机器人治疗,发现BCI机器人组的患者FMA评分在训练后显著改善,认为SSVEP-BCI控制机器人比仅机器人康复效果更好。

2.3 基于BCI模式的视觉反馈训练 视觉器官在接收外界刺激后,视觉中枢参与和形成视觉感知反应和认知反馈。视觉反馈训练能给予患者丰富的视觉和日常生活情景模拟,对防治废用综合征及加速上肢运动功能恢复具有重要意义^[32]。提供视觉反馈的形式从二维的图片、文字发展到三维的虚拟现实(virtual reality, VR),反馈内容也变得更加多样化和具有激励性。Pichiorri等^[33]将28例脑卒中患者随机分为BCI组和无BCI对照组,在MI任务过程中,通过计算机屏幕向患者提供瘫痪手闭合和打开的视觉表征形式反馈,BCI组患者上肢FMA评分和肌力增加更显著。Foong等^[34]采用一种MI-BCI模式下的视觉反馈系统,对13名脑卒中患者进行6周的上肢训练。训练后患者上肢FMA评分在第12和24周时明显提高,表明MI-BCI系统结合视觉反馈训练能帮助脑卒中患者维持短期上肢运动功能改善。Halme等^[35]发现,MI过程会导致运动皮层功能变化,但这种效果不是通过视觉反馈来实现的,认为纯粹的视觉反馈对神经康复的影响还有待证实。

2.4 基于BCI模式的多模态反馈训练 如前所述,基于BCI模式的FES、上肢康复机器人可提供本体感觉反馈以及基于BCI模式的视觉反馈训练可有效促进脑卒中后上肢运动功能改善。不同的反馈信息产生不同的作用效果,基于BCI的多模态反馈可能使疗效更显著^[36]。Miao等^[37]对脑卒中后遗症期患者进行BCI-FES训练,虚拟肢体和FES都被用作反馈,帮助患者通过视觉和感官途径改善上肢运动功能。Hu等^[38]也发现结合感觉和视觉反馈的BCI训练可以增强MI能力,有效改善慢性脑卒中患者的上肢和手部

功能障碍。

3 基于BCI模式的训练联合其他训练方法在脑卒中后上肢康复中的应用

Johnson等^[39]发现将BCI训练与重复经颅磁刺激(repeated transcranial magnetic stimulation, rTMS)结合,通过下调来自对侧半球的过度抑制并增加同侧病变皮质的激来促进脑卒中后运动活动和行为功能改善。Lee等^[40]将BCI-FES系统与动作观察训练(action observation training, AOT)与结合,发现干预后脑卒中患者上肢FMA评分、腕屈曲活动度以及日常生活活动评分均提高。Li等^[41]将多感官反馈(本体感觉、视觉、听觉)的BCI训练与音频提示、运动观察训练以及常规疗法结合,结果表明可以促进脑卒中患者持久的上肢运动改善。Chen等^[42]将SSVEP-BCI系统与增强现实(augmented reality, AR)以及计算机视觉相结合,构建了一种新型的机器人控制系统,AR允许机械手臂和视觉刺激都在用户的视野内,可缓解用户注意力转移的问题,使用户与机械手臂之间的交互变得更加自然和直观。

4 基于BCI的康复训练影响脑卒中上肢运动功能康复的神经机制

目前普遍认为BCI训练影响脑卒中后上肢运动功能康复的机制与神经可塑性密切相关,但仍不十分明确,可能主要包括以下三个方面^[43-44]。

4.1 皮质激活状态改变 皮质激活状态可由事件相关去同步化(event-related desynchronization, ERD)来反映,更强的ERD代表更好的大脑功能和大脑可塑性^[45]。Chen等^[28]发现对侧感觉运动皮层的ERD随着BCI干预时间的持续增强,而患者的上肢运动功能也得到更大的改善。Bhagat等^[27]认为BCI训练后患侧半球的激活程度更高,对侧半球的抑制程度更高。Ang等^[44]发现经BCI训练后的患者大脑对称性指数与上肢运动功能改善程度呈负相关,即脑电不对称程度越高的患者运动功能改善越少,提示双侧皮层半球的激活更有利于上肢运动功能恢复。这表明改变皮质激活状态是BCI训练促进脑卒中上肢康复的重要机制,但具体哪侧大脑半球被激活尚存在争议。

4.2 神经网络功能连接的改变 Wu等^[46]发现BCI训练后,半球间和半球内的功能连接(functional connectivity, FC)增加,并且两半球间的体感联合皮层和壳核之间FC增加与手部控制和功能恢复显著相关。Yuan等^[47]利用静息态功能磁共振技术(resting-state functional magnetic resonance imaging, rs-fMRI)和

任务态功能性磁共振技术(task-based functional magnetic resonance imaging, task-based fMRI)以及弥散张量成像技术(diffusion tensor imaging, DTI)研究BCI干预后大脑的功能重组及其结构基础,发现病灶同侧运动区和某些病灶对侧运动区之间的FC显著增加,同侧M1的FC变化与上肢运动功能改善显著相关;感觉运动区的两半球间FC和偏侧性指数增加共同表明了上肢运动功能恢复过程中两半球的重新平衡。近期一项研究在对脑卒中患者实施BCI干预并使用功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)检测神经可塑性变化,发现与患手抓握相关的大脑激活模式变化以及BCI训练后同侧M1区与额叶皮层之间的FC增强^[48]。

4.3 皮质脊髓束完整性改变 除了大脑不同脑区间网络结构和功能的变化机制外,BCI训练还可通过提高皮质脊髓束的完整性来调节神经可塑性,从而促进运动功能的改善^[49]。皮质脊髓束的完整性与脑卒中后上肢的运动表现和预后相关^[50-51],而运动诱发电位(motor-evoked potential, MEP)是检测皮质脊髓束功能完整性的常用手段^[52]。有研究发现每次BCI训练后MEP振幅均显著增加^[53],而无BCI控制组在任何刺激强度下都没有明显变化。Caria等^[54]采用DTI,以分数各向异性(fractional anisotropy, FA)反映BCI训练前后皮质脊髓束的结构完整性,发现胼胝体和对侧后丘脑放射区FA越高,即皮质脊髓束结构完整性越好,上肢FMA评分增加越多,上肢功能恢复越好。这一观点也得到了其他研究的支持^[55]。

5 小结

基于BCI的康复训练可诱导神经可塑性变化和大脑功能重塑,促进脑卒中患者上肢运动功能的康复。值得注意的是,基于BCI的康复训练如何为患者提供更好的康复体验,从而真正地得到推广应用,仍有几个关键问题亟待解决。

首先,脑卒中上肢康复临床应用中最为常用的是基于MI-BCI的神经反馈康复训练系统,患者的MI能力是决定康复效果的首要因素,需要患者花费较长时间学习掌握MI技巧,认知能力欠佳、体质较差等主观问题可能会影响训练的疗效。其次,缺乏标准的和个体化的临床实施方案。在不同训练中,FES采用的频率、强度、时间,上肢机器人支持或辅助的类型、涉及的关节数量及运动任务的特征等各不相同。在康复训练过程中,应根据特定肌群、任务模式和患者自身情况选择或调整至最佳的训练方式和参数,为患者提个性化、最优化的治疗方案。再次,脑卒中患者主要是通过重

组正常半球和发病灶半球保留的运动回路来实现上肢运动功能康复,但不同外部设备在闭环回路中扮演的角色尚无定论。未来仍需要更多高质量研究进一步探究 BCI 训练促进脑卒中上肢康复的作用机制。综上所述,基于 BCI 的训练在脑卒中后上肢功能康复中有广阔应用前景。明确 BCI 训练的作用机制和实现更加个性化、智能化的康复训练过程,是 BCI 未来的发展趋势。

【参考文献】

- [1] 王陇德,彭斌,张鸿祺,等.《中国脑卒中防治报告 2020》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2022, 19(2): 136-144.
- [2] Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990-2019; a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Lancet Neurol*, 2021, 20(10): 795-820.
- [3] Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke; a systematic review[J]. *Lancet Neurol*, 2009, 8(8): 741-754.
- [4] Lawrence E S, Coshall C, Dundas R, et al. Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multi-ethnic population[J]. *Stroke*, 2001, 32(6): 1279-1284.
- [5] Coscia M, Wessel M J, Chaudary U, et al. Neurotechnology-aided interventions for upper limb motor rehabilitation in severe chronic stroke[J]. *Brain*, 2019, 142(8): 2182-2197.
- [6] Cervera M A, Soekadar S R, Ushiba J, et al. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis[J]. *Ann Clin Transl Neurol*, 2018, 5(5): 651-663.
- [7] Yang W, Zhang X, Li Z, et al. The Effect of Brain-Computer Interface Training on Rehabilitation of Upper Limb Dysfunction After Stroke: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2022, 15: 766879.
- [8] Li J, Zhang L. Active training paradigm for motor imagery BCI[J]. *Exp Brain Res*, 2012, 219(2): 245-254.
- [9] Casimo K, Weaver K E, Wander J, et al. BCI Use and Its Relation to Adaptation in Cortical Networks[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2017, 25(10): 1697-1704.
- [10] Abiri R, Borhani S, Sellers E W, et al. A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms[J]. *J Neural Eng*, 2019, 16(1): 011001.
- [11] Yu T, Xiao J, Wang F, et al. Enhanced Motor Imagery Training Using a Hybrid BCI With Feedback[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2015, 62(7): 1706-1717.
- [12] Zuo C, Jin J, Yin E, et al. Novel hybrid brain-computer interface system based on motor imagery and P300[J]. *Cogn Neurodyn*, 2020, 14(2): 253-265.
- [13] 琚芬,赵晨光,袁华,等.脑机接口在康复医学中的应用进展[J]. 中国康复, 2017, 32(6): 508-511.
- [14] Moe J H, Post H W. Functional electrical stimulation for ambulation in hemiplegia[J]. *J Lancet*, 1962, 82: 285-288.
- [15] Jang Y Y, Kim T H, Lee B H. Effects of Brain-Computer Interface-controlled Functional Electrical Stimulation Training on Shoulder Subluxation for Patients with Stroke: A Randomized Controlled Trial[J]. *Occup Ther Int*, 2016, 23(2): 175-185.
- [16] 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.
- [17] Tabernig C B, Lopez C A, Carrere L C, et al. Neurorehabilitation therapy of patients with severe stroke based on functional electrical stimulation commanded by a brain computer interface[J]. *J Rehabil Assist Technol Eng*, 2018, 5: 2055668318789280.
- [18] Hesse S, Mehrholz J, Werner C. Robot-assisted upper and lower limb rehabilitation after stroke: walking and arm/hand function[J]. *Dtsch Arztebl Int*, 2008, 105(18): 330-336.
- [19] Marchal-Crespo L, Reinkensmeyer D J. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2009, 6: 20.
- [20] Mehrholz J, Pollock A, Pohl M, et al. Systematic review with network meta-analysis of randomized controlled trials of robotic-assisted arm training for improving activities of daily living and upper limb function after stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 83.
- [21] Langhorne P, Bernhardt J, Kwakkel G. Stroke rehabilitation[J]. *Lancet*, 2011, 377(9778): 1693-1702.
- [22] 刘岩松,孙青峰,李红玲. 康复机器手在脑卒中后手功能康复中的研究进展[J]. 中国康复, 2022, 37(7): 430-434.
- [23] Jiang N, Gizzi L, Mrachacz-Kersting N, et al. A brain-computer interface for single-trial detection of gait initiation from movement related cortical potentials[J]. *Clin Neurophysiol*, 2015, 126(1): 154-159.
- [24] Baniqued P D E, Stanyer E C, Awais M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 15.
- [25] Ang K K, Guan C, Phua K S, et al. Brain-computer interface-based robot end effector system for wrist and hand rehabilitation; results of a three-armed randomized controlled trials for chronic stroke[J]. *Frontiers in neuroengineering*, 2014, 7: 30.
- [26] Frolov A A, Mokienko O, Lyukmanov R, et al. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2017, 11: 400.
- [27] Bhagat N A, Yozbatiran N, Sullivan J L, et al. Neural activity modulations and motor recovery following brain-exoskeleton interface mediated stroke rehabilitation [J]. *Neuroimage Clin*, 2020, 28: 102502.
- [28] Chen S, Cao L, Shu X, et al. Longitudinal Electroencephalography Analysis in Subacute Stroke Patients During Intervention of Brain-Computer Interface With Exoskeleton Feedback [J]. *Frontiers in neuroscience*, 2020, 14: 809.
- [29] Ramos-Murguialday A, Curado M R, Broetz D, et al. Brain-Machine Interface in Chronic Stroke: Randomized Trial Long-Term Follow-up[J]. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 2019, 33(3): 188-198.
- [30] Cheng N, Phua K S, Lai H S, et al. Brain-Computer Interface-Based Soft Robotic Glove Rehabilitation for Stroke[J]. *IEEE*

- transactions on bio-medical engineering, 2020, 67(12): 3339-3351.
- [31] 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 transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 2022, 30: 1737-1744.
- [32] 朱美红, 王晶, 顾旭东, 等. 视觉反馈训练对脑卒中患者日常生活活动能力的影响[J]. 中华护理杂志, 2015, 50(5): 577-581.
- [33] Pichiorri F, Morone G, Petti M, et al. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery[J]. Annals of neurology, 2015, 77(5): 851-865.
- [34] Foong R, Tang N, Chew E, et al. Assessment of the Efficacy of EEG-Based MI-BCI with Visual Feedback and EEG Correlates of Mental Fatigue for Upper-Limb Stroke Rehabilitation[J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2020, 67(3): 786-795.
- [35] Halme H L, Parkkonen L. The effect of visual and proprioceptive feedback on sensorimotor rhythms during BCI training[J]. PLoS One, 2022, 17(2): e0264354.
- [36] Ramos-Murguialday A, Schürholz M, Caggiano V, et al. Proprioceptive feedback and brain computer interface (BCI) based neuroprostheses[J]. PLoS One, 2012, 7(10): e47048.
- [37] Miao Y, Chen S, Zhang X, et al. BCI-Based Rehabilitation on the Stroke in Sequela Stage [J]. Neural Plast, 2020, 2020: 8882764.
- [38] Hu Y Q, Gao T H, Li J, et al. Motor Imagery-Based Brain-Computer Interface Combined with Multimodal Feedback to Promote Upper Limb Motor Function after Stroke: A Preliminary Study [J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2021, 2021: 1116126.
- [39] Johnson N N, Carey J, Edelman B J, et al. Combined rTMS and virtual reality brain-computer interface training for motor recovery after stroke[J]. J Neural Eng, 2018, 15(1): 016009.
- [40] Lee S H, Kim S S, Lee B H. 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]. Physiotherapy theory and practice, 2022;38(9):1126-1134.
- [41] Li X, Wang L, Miao S, et al. Sensorimotor Rhythm-Brain Computer Interface With Audio-Cue, Motor Observation and Multi-sensory Feedback for Upper-Limb Stroke Rehabilitation: a Controlled Study[J]. Frontiers in neuroscience, 2022, 16: 808830.
- [42] Chen X, Huang X, Wang Y, et al. Combination of Augmented Reality Based Brain- Computer Interface and Computer Vision for High-Level Control of a Robotic Arm[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2020, 28(12): 3140-3147.
- [43] Bai Z, Fong K N K, Zhang J J, et al. Immediate and long-term effects of BCI-based rehabilitation of the upper extremity after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. J Neuroeng Rehabil, 2020, 17(1): 57.
- [44] Ang K K, Guan C. Brain-Computer Interface for Neurorehabilitation of Upper Limb After Stroke[J]. Proceedings of the Ieee, 2015, 103(6): 944-953.
- [45] Ono T, Tomita Y, Inose M, et al. Multimodal sensory feedback associated with motor attempts alters BOLD responses to paralyzed hand movement in chronic stroke patients[J]. Brain Topogr, 2015, 28(2): 340-351.
- [46] Wu Q, Yue Z, Ge Y, et al. Brain Functional Networks Study of Subacute Stroke Patients With Upper Limb Dysfunction After Comprehensive Rehabilitation Including BCI Training[J]. Frontiers in neurology, 2020, 10: 1419.
- [47] 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.
- [48] Liu L, Jin M, Zhang L, et al. Brain - Computer Interface-Robot Training Enhances Upper Extremity Performance and Changes the Cortical Activation in Stroke Patients: a Functional Near-Infrared Spectroscopy Study[J]. Frontiers in neuroscience, 2022, 16: 809657.
- [49] Halder S, Varkuti B, Bogdan M, et al. Prediction of brain-computer interface aptitude from individual brain structure[J]. Front Hum Neurosci, 2013, 7: 105.
- [50] Stinear C M, Lang C E, Zeiler S, et al. Advances and challenges in stroke rehabilitation[J]. The Lancet Neurology, 2020, 19(4): 348-360.
- [51] Cho M K, Jang S H. Peri-infarct reorganization of an injured corticospinal tract in a patient with cerebral infarction[J]. Neural Regen Res, 2021, 16(8): 1671-1672.
- [52] Bestmann S, Krakauer J W. The uses and interpretations of the motor-evoked potential for understanding behaviour [J]. Exp Brain Res, 2015, 233(3): 679-689.
- [53] Mrachacz-Kersting N, Jiang N, Stevenson A J, et al. Efficient neuroplasticity induction in chronic stroke patients by an associative brain-computer interface[J]. J Neurophysiol, 2016, 115(3): 1410-1421.
- [54] Caria A, Da Rocha J L D, Gallitto G, et al. Brain-Machine Interface Induced Morpho-Functional Remodeling of the Neural Motor System in Severe Chronic Stroke[J]. Neurotherapeutics, 2020, 17(2): 635-650.
- [55] 吴琼, 葛云祥, 马迪, 等. 影响脑卒中患者脑机接口上肢训练效果的相关因素[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(3): 269-276.