

基于脑机接口技术的外部设备在脑卒中患者上肢功能康复中的应用

贾凡¹ 张莉¹ 袁艳秋² 唐玮³ 张明^{1,2,3}

¹徐州医科大学附属徐州康复医院,徐州 221003; ²徐州市中心医院康复医学科/徐州医科大学徐州临床学院,徐州 221009; ³中国矿业大学机电工程学院,徐州 221116

通信作者:张明,Email:zm1455@163.com

【摘要】 脑机接口技术是逐渐应用于神经康复领域的一种新兴技术。外部设备是脑机接口技术的输出媒介,其功能及设计取决于患者的需求和想法,具有能直接被患者接触、感知的特性。本文将从外部设备的角度系统介绍脑机接口技术在脑卒中患者上肢功能康复中的应用现状。

【关键词】 脑机接口; 脑卒中; 上肢功能障碍

基金项目: 徐州市科技局重点研发计划项目(KC20133); 徐州市国家临床重点专科培育项目(2018ZK002); 徐州市医学重点人才培养项目(XWRCHT20220045)

Funding: Xuzhou Science and Technology Project(KC20133); Xuzhou National Clinical Key Specialist Training Project(2018ZK002); Xuzhou Medical Key Talent Training Project(XWRCHT20220045)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.03.015

脑卒中是全球导致死亡的第二大疾病,每年新增病例数已超过 200 万^[1]。随着科技发展及医疗水平进步,近年来脑卒中死亡率呈下降趋势,有康复潜能及需求的患者数量日益增多。上肢功能恢复对脑卒中患者日常生活活动至关重要,也是脑卒中康复的主要目标之一。虽然传统康复治疗手段(如强制性运动疗法、约束诱导运动疗法、作业治疗等)对脑卒中患者具有一定效果,但大多数患者还无法恢复完全自主运动,且治疗过程单调枯燥,整体康复疗效并不理想^[2]。

随着人工智能快速发展,脑机接口(brain-computer interface,BCI)技术已逐渐应用于康复医学领域。BCI 技术可以在大脑和外部设备间建立实时连接^[3],患者可通过意念驱动外部设备,并由此产生反馈实现双向互动。BCI 技术应用于脑卒中患者上肢功能康复的外部设备主要包括功能性电刺激(functional electric stimulation,FES)装置、外骨骼机器人、末端机器人和虚拟现实(virtual reality,VR)设备等,其可直接被患者接触感知的特性在临床上具有重要意义。本文将从外部设备的角度对 BCI 技术在脑卒中患者上肢功能康复中的临床应用现状进行简要综述。

BCI 技术概述及发展历程

BCI 技术是通过解码神经或生理信号来识别患者移动或执行任务的意图,然后借助外部设备提供辅助力量帮助患者实现针对特定目标的重复训练,并形成实时监测与反馈,从而帮助患者恢复或重建神经回路。

在 1999 年 6 月召开的首次 BCI 国际会议上,“脑机接口”一词被正式定义为一种不依赖大脑常规输出通路(如外周神经、肌肉等)的通信技术^[3],其主要是基于 Hebbian 学习原理,通过将脑的传出及传入信号耦合以诱导神经重塑^[4]。2012 年匹兹堡大学研究团队^[5]成功将芯片植入到一位 52 岁四肢瘫痪

患者的运动皮质中,使患者通过大脑控制装有芯片的机械手臂,在不到 4 个月的时间里患者能完成 7 维运动。在 2014 年巴西世界杯开幕式上,因第 4 胸椎脊髓损伤导致身体瘫痪 9 年的青年 Juliano Pinto 在 BCI 技术与外骨骼机器人的帮助下成功完成了踢球动作。2016 年 Bouton 等^[6]将皮质内微电极阵列植入到一例因颈髓损伤导致四肢瘫痪的患者体内,并记录该患者运动皮质的多单元活动,通过高分辨率神经肌肉电刺激系统控制其前臂肌肉的激活,最终成功实现了上肢较精细的功能控制活动。Flesher 等^[7]在 2021 年使用一种双向 BCI 技术记录运动皮质的神经活动,并通过诱发触觉感知来代偿视觉反馈,将患者抓取及转移物体时间从 20.9 s 缩短至 10.2 s。

随着科技不断发展进步,近年来 BCI 技术逐渐成熟,在康复医学领域中的应用也越来越广泛。BCI 技术的应用是现代康复的新尝试,要求患者在训练期间保持高水平注意力,通过多次重复刺激中枢,能增强神经组织可塑性^[8],有效弥补传统康复干预的不足,同时还可以存储及提供数据供康复治疗师分析,帮助临床改进康复治疗手段。

基于 BCI 技术的外部设备在脑卒中患者上肢康复中的应用

BCI 技术在脑卒中患者上肢功能康复中的重要作用已得到初步证实^[9-10]。有研究表明,BCI 训练可诱发脑卒中患者脑电感觉运动频谱改变,其上肢功能改善与同侧半球内部连接增强有关^[11]。根据外部设备的不同类型,本文将系统介绍 BCI 技术在脑卒中患者上肢功能康复中的应用现状。

一、BCI-FES

功能性电刺激技术是通过对待侧肢体输入电脉冲来刺激肌肉产生收缩^[12],能促进脑卒中患者肢体功能恢复及神经重塑。当 FES 与 BCI 结合时,不仅能激活机体传入及传出神经通路,还能促进大脑皮质重组并改善患者上肢功能^[13]。

Jang 等^[14]利用 BCI 控制的 FES 装置对 20 例脑卒中患者进行干预,根据患者脑电信号发放电刺激使冈上肌及三角肌收缩,从而实现肩关节复位,结果表明 BCI-FES 治疗可促进脑卒中患者运动功能恢复,有效改善肩关节半脱位。Biasiucci 等^[15]采用 BCI-FES 刺激脑卒中患者偏瘫侧伸腕肌,经 5 周干预后发现 BCI-FES 治疗较 FES 治疗能更有效促进慢性脑卒中患者运动功能恢复,特别是在治疗结束 6 个月到 12 个月期间,患者上肢功能改善情况仍较显著。另一项研究也发现脑卒中患者在 BCI-FES 治疗结束后,其疗效持续时间可达 6 个月^[16]。唐千千等^[17]对脑梗死患者进行了为期 4 周观察,发现治疗后 BCI-FES 组和 FES 组上肢功能、患肘关节反应时间、肘关节位置觉误差、日常生活活动能力均明显改善,并且 BCI-FES 组上述指标改善情况均显著优于 FES 组。

但 FES 并不是适合所有肢体功能障碍患者,如对于下运动神经元疾病或周围神经损伤而失去神经支配的患者,FES 的治疗效果不佳^[18];而且还有一些感觉过敏的患者,可能会无法忍受 FES 刺激时所伴随的肌肉疼痛而拒绝治疗。

二、BCI-机器人

机器人可辅助康复治疗师对患者进行持续重复训练,是 BCI 上肢康复系统中使用最多的反馈设备^[19]。单一的机器人辅助治疗优势并不明显,但当与 BCI 结合后会形成中枢神经系统与外周神经系统之间的“闭环通路”,从而促进患者大脑功能重塑、肢体功能恢复^[20]。大多数用于上肢康复的机器人设备以外骨骼机器人或末端机器人的形式存在。

1. BCI-外骨骼机器人:外骨骼机器人是一种可穿戴设备,需与患者关节相匹配,患者能通过机械驱动操纵患肢执行指定动作^[21-22]。Bundy 等^[23]通过手臂动作调查测试(action research arm test, ARAT)证明了 BCI-外骨骼机器人在改善脑卒中患者抓取、握力及粗大运动功能方面具有确切疗效,并且发现健侧半球与功能恢复间具有潜在关联性。吴琼等^[24]利用运动想象(motor imagery, MI)手段及 BCI-外骨骼机器人对 23 例亚急性脑卒中患者进行训练,4 周后发现所有患者 Fugl-Meyer 运动功能量表上肢部分(Fugl-Meyer assessment-upper extremities, FMA-UE)评分均明显增加。Frolov 等^[25]通过双盲对照研究发现,入选脑卒中患者经 BCI-外骨骼机器人训练 2~3 周后,其上肢运动功能(包括手部抓握、握握功能)获得明显改善。

目前部分研究使用的外骨骼机器人通常是由刚性连杆或关节驱动,无法贴合穿戴,容易导致皮肤磨损^[26];后续又开发了柔性外骨骼系统,其设计更符合人机工程学原理,并且重量轻、便于携带^[27-29]。Cheng 等^[30]将 11 例慢性脑卒中患者随机分为 BCI-柔性机械手套(soft robotic glove, SRG)组和 SRG 组,在 6 周干预期间发现 2 组患者 FMA、ARAT 评分组间差异均无统计学意义($P>0.05$),但治疗结束后 BCI-SRG 组 FMA 及 ARAT 评分均较 SRG 组进一步持续改善。Zhang 等^[31]开发了一种能使用眼电图(electrooculogram, EOG)、脑电图(electroencephalogram, EEG)及肌电图(electromyography, EMG)联合控制的柔性气动手套,患者可通过眨眼选择不同的模式并执行各种动作,对重度瘫痪患者更友好方便。

2. BCI-末端机器人:末端机器人是一种非穿戴设备,患者通过手柄或附件向肢体最远端施加作用力以产生运动,患者关节与其无匹配关系^[21-22],无法实现某个关节的特定动作。目前

大多数商用系统都是末端机器人,因为这是一种更成熟、稳定的设备类型^[32]。

Ranzani 等^[33]使用一种名为 ReHapticKnob 的末端机器人对脑卒中患者进行为期 4 周的随机对照实验,结果表明末端机器人与常规康复干预比较,二者在改善脑卒中患者上肢功能方面具有等效性,与 Ang 等^[34]报道结果基本一致。但 Ang 等^[34]同时也利用 BCI-末端机器人对脑卒中患者进行了 6 周干预实验,发现在第 3 周、第 12 周及第 24 周时 BCI-末端机器人组的改善效果明显优于标准治疗组和末端机器人组,进一步证明了 BCI 联合末端机器人对脑卒中患者上肢功能恢复具有积极作用。另一项研究将 26 例脑卒中患者随机分为 BCI-Manus 组和 Manus 组,选用上世纪 90 年代初麻省理工学院研发的 MIT-Manus 末端牵引式机器人进行干预,4 周后发现 BCI-Manus 组超过 60% 患者其运动功能获得显著改善^[35]。有学者进一步分析了经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)联合 BCI-末端机器人对脑卒中患者功能恢复的影响^[36],提出定量脑电图(quantitative electroencephalography, QEEG)可预测治疗效果,从而实现个性化康复干预。但目前末端机器人在康复中的应用逐渐减少,可能是因为相较于外骨骼机器人,末端机器人能实现的关节自由度数量以及关节活动范围均有限,难以模拟人体上肢日常行为运动轨迹,无法帮助患者手指或手腕全范围运动。

三、BCI-VR

虚拟现实技术是指利用计算机合成虚拟三维环境模型,使用者与虚拟环境中的物体交互并产生多感官反馈,从而获得身临其境的感受^[37]。目前 BCI 联合 VR 技术已成为康复领域中的研究热点,且仍处于研发阶段,具有巨大发展潜能。

Saposnik 等^[38]采用 Meta 分析证明 VR 技术可与传统脑卒中上肢康复治疗相结合,提高患者上肢功能训练的积极性。Vourvopoulos 等^[39]研究发现 BCI-VR 干预能提高 4 例慢性脑卒中患者(伴有不同程度运动损伤)的运动功能评分,同时还能改善患者脑部运动神经网络的可塑性。高诺等^[26]使用一种基于 BCI 与 VR 的手部软康复系统,发现能显著改善脑卒中患者大脑可塑性,协助患者主动完成康复训练任务,并为其提供运动感觉及本体感觉反馈。Johnson 等^[40]将重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)与 BCI-VR 技术相结合,发现真 rTMS+BCI-VR 组及假 rTMS+BCI-VR 组患者均观察到运动功能改善,但只有前者出现明显的半球间抑制改变,并利用功能磁共振成像观察到病灶侧皮质激活增强。

与传统康复疗法比较,BCI-VR 技术可通过增强视觉及触觉反馈,有助于提高康复训练吸引力及患者治疗积极性,从而缩短训练周期,加速患者大脑功能重组及肢体功能恢复。随着科学技术飞速发展,BCI-VR 技术将会在脑卒中康复领域发挥更大的作用。

结语

当前 BCI 技术不断改进,如建立混合模式^[41-43]和对用户友好的 EEG 系统^[44-45],Colamarino 等^[46]提出了一种新型 GUIDER 算法,更适合康复治疗师及临床医生使用,促进了 BCI 技术在脑卒中康复中的广泛应用。但目前 BCI 技术在应用于脑卒中患者上肢康复方面仍存在许多问题,包括:①现有关于 BCI 研

究的样本量均偏小,患者间异质性较大,双盲法难以实施;②BCI 算法的准确性较低且容易受外界影响;③BCI 设备的购置价格过高,保养及维护难度较大;④目前使用 BCI 技术需专业人员操作,缺少可由脑卒中患者在无外部帮助情况下独立操作的 BCI 系统。随着科技发展及对 BCI 领域研究的不断深入,相信上述问题会被逐渐解决并不断改进、研发 BCI 新设备,为脑卒中患者带来更多的康复机会。

参 考 文 献

- [1] Wu S, Wu B, Liu M, et al. Stroke in China: advances and challenges in epidemiology, prevention, and management [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18(4): 394-405. DOI: 10.1016/S1474-4422(18)30500-3.
- [2] Tedesco TL, Kennedy N, Smith T, et al. Predictors of upper limb spasticity after stroke? A systematic review and meta-analysis [J]. *Physiotherapy*, 2019, 105(2): 163-173. DOI: 10.1016/J.PHYSIO.2019.01.004.
- [3] Wolpaw JR, Birbaumer N, Heetderks WJ, et al. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting [J]. *IEEE Trans Rehabil Eng*, 2000, 8(2): 164-173. DOI: 10.1109/tre.2000.847807.
- [4] Mane R, Chouhan T, Guan C. BCI for stroke rehabilitation: motor and beyond [J]. *J Neural Eng*, 2020, 17(4): 041001. DOI: 10.1088/1741-2552/aba162.
- [5] Collinger JL, Wodlinger B, Downey JE, et al. High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia [J]. *Lancet*, 2013, 381(9866): 557-564. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)61816-9.
- [6] Bouton CE, Shaikhouni A, Annetta NV, et al. Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia [J]. *Nature*, 2016, 533: 247-250. DOI: 10.1038/NATURE17435.
- [7] Flesher SN, Downey JE, Weiss JM, et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control [J]. *Science*, 2021, 372(6544): 831-836. DOI: 10.1126/SCIENCE.ABD0380.
- [8] 朱玉连, 梁思捷. 脑机接口技术治疗脑卒中后运动功能障碍研究进展 [J]. *康复学报*, 2020, 30(2): 162-166. DOI: 10.3724/SP.J.1329.2020.02015.
- [9] 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]. *Front Neurosci*, 2022, 15: 766879. DOI: 10.3389/fnins.2021.766879.
- [10] Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 15. DOI: 10.1186/s12984-021-00820-8.
- [11] Pichiorri F, Morone G, Petti M, et al. Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery [J]. *Ann Neurol*, 2015, 77(5): 851-865. DOI: 10.1002/ana.24390.
- [12] Borton D, Micera S, Del R, et al. Personalized neuroprosthetics [J]. *Sci Transl Med*, 2013, 5(210): 210. DOI: 10.1126/scitranslmed.3005968.
- [13] Sinha AM, Nair VA, Prabhakaran V. Brain-computer interface training with functional electrical stimulation: facilitating changes in interhemispheric functional connectivity and motor outcomes post-stroke [J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 670953. DOI: 10.3389/fnins.2021.670953.
- [14] Jang YY, Kim TH, Lee BH. 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. DOI: 10.1002/oti.1422.
- [15] 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.
- [16] Sebastián-Romagosa M, Cho W, Ortner R, et al. Brain computer interface treatment for motor rehabilitation of upper extremity of stroke patients—a feasibility study [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 591435. DOI: 10.3389/fnins.2020.591435.
- [17] 唐千弋, 张通. 脑机接口控制的功能性电刺激对脑卒中患者上肢功能障碍的康复效果 [J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(7): 802-806. DOI: 10.3969/j.issn.1006.9771.2021.07.011.
- [18] 隋宝石, 万柏坤. 功能性电刺激与脑机接口在医学中的应用 [J]. *中国医疗设备*, 2011, 26(6): 63-66. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2011.06.021.
- [19] Bai Z, Fong KNK, Zhang JJ, 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. DOI: 10.1186/S12984-020-00686-2.
- [20] Mansour S, Ang KK, Nair KPS, et al. Efficacy of brain-computer interface and the impact of its design characteristics on poststroke upper-limb rehabilitation: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Clin EEG Neurosci*, 2022, 53(1): 79-90. DOI: 10.1177/15500594211009065.
- [21] Molteni F, Gasperini G, Cannaviello G, et al. Exoskeleton and end-effector robots for upper and lower limbs rehabilitation: narrative review [J]. *PM R*, 2018, 10(9): S174-188. DOI: 10.1016/J.PMRJ.2018.06.005.
- [22] Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 15. DOI: 10.1186/s12984-021-00820-8.
- [23] Bundy DT, Souders L, Baranyai K, et al. Contralesional brain-computer interface control of a powered exoskeleton for motor recovery in chronic stroke survivors [J]. *Stroke*, 2017, 48(7): 1908-1915. DOI: 10.1161/STROKEAHA.116.016304.
- [24] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006.9771.2021.03.004.
- [25] Frolov AA, Húsek D, Biryukova EV, et al. Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery [J]. *Neural Netw World*, 2017, 27(1): 107-137. DOI: 10.14311/NNW.2017.27.006.
- [26] 高诺, 陈鹏程. 基于脑机接口与虚拟现实技术的手部软康复系统研究 [J]. *生物医学工程研究*, 2022, 41(1): 32-40. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2022.01.06.
- [27] Polygerinos P, Correll N, Morin SA, et al. Soft robotics: review of fluid-driven intrinsically soft devices; manufacturing, sensing, control, and applications in human-robot interaction [J]. *Adv Eng Mater*, 2017, 19(12): 1700016. DOI: 10.1002/ADEM.201700016.
- [28] Laschi C, Mazzolai B, Cianchetti M. Soft robotics: technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities [J]. *Sci Robot*, 2016, 1(1): 3690. DOI: 10.1126/scirobotics.aah3690.
- [29] Walsh C. Human-in-the-loop development of soft wearable robots [J]. *Nat Rev Mater*, 2018, 3(6): 78-80. DOI: 10.1038/S41578-018-

- 0011-1.
- [30] Cheng N, Phua KS, Lai HS, et al. Brain-computer interface-based soft robotic glove rehabilitation for stroke [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2020, 67(12): 3339-3351. DOI: 10.1109/TBME.2020.2984003.
 - [31] Zhang J, Wang B, Zhang C, et al. An EEG/EMG/EOG-based multimodal human-machine interface to real-time control of a soft robot hand [J]. *Front Neurobot*, 2019, 13: 7. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00007.
 - [32] McConnell AC, Moiola RC, Brasil FL, et al. Robotic devices and brain-machine interfaces for hand rehabilitation post-stroke [J]. *J Rehabil Med*, 2017, 49(6): 449-460. DOI: 10.2340/16501977-2229.
 - [33] Ranzani R, Lamercy O, Metzger JC, et al. Neurocognitive robot-assisted rehabilitation of hand function: a randomized control trial on motor recovery in subacute stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 115. DOI: 10.1186/S12984-020-00746-7.
 - [34] Ang KK, Guan C, Phua KS, et al. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke [J]. *Front Neuroeng*, 2014, 7: 30. DOI: 10.3389/fneng.2014.00030.
 - [35] Ang KK, Chua KSG, Phua KS, et al. A randomized controlled trial of EEG-based motor imagery brain-computer interface robotic rehabilitation for stroke [J]. *Clin EEG Neurosci*, 2015, 46(4): 310-320. DOI: 10.1177/1550059414522229.
 - [36] Mane R, Chew E, Phua KS, et al. Prognostic and monitory EEG-biomarkers for BCI upper-limb stroke rehabilitation [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2019, 27(8): 1654-1664. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2924742.
 - [37] 梁明, 窦祖林, 王清辉, 等. 虚拟现实技术对不同类型脑卒中患者偏瘫上肢功能的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2014, 36(8): 592-595. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2014.08.005.
 - [38] Saposnik G, Levin M. Virtual reality in stroke rehabilitation: A meta-analysis and implications for clinicians [J]. *Stroke*, 2011, 42(5): 1380-1386. DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.605451.
 - [39] Vourvopoulos A, Pardo OM, Lefebvre S, et al. Effects of a brain-computer interface with virtual reality (VR) neurofeedback: a pilot study in chronic stroke patients [J]. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 210. DOI: 10.3389/fnhum.2019.00210.
 - [40] Johnson NN, Carey J, Edelman BJ, et al. Combined rTMS and virtual reality brain-computer interface training for motor recovery after stroke [J]. *J Neural Eng*, 2018, 15(1): 016009. DOI: 10.1088/1741-2552/AA8CE3.
 - [41] Hu YQ, Gao TH, 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. DOI: 10.1155/2021/1116126.
 - [42] Colamarino E, De Seta V, Masciullo M, et al. Corticomuscular and intermuscular coupling in simple hand movements to enable a hybrid brain-computer interface [J]. *Int J Neural Syst*, 2021, 31(11): 2150052. DOI: 10.1142/S0129065721500520.
 - [43] Kwon J, Shin J, Im CH. Toward a compact hybrid brain-computer interface (BCI): performance evaluation of multi-class hybrid EEG-fNIRS BCIs with limited number of channels [J]. *PLoS One*, 2020, 15(3): e0230491. DOI: 10.1371/journal.pone.0230491.
 - [44] Cavallo A, Roth V, Haslacher D, et al. Minimizing biosignal recording sites for noninvasive hybrid brain/neural control [J]. *IEEE Syst J*, 2021, 15(2): 1540-1546. DOI: 10.1109/JSYST.2020.3021751.
 - [45] Kam JWY, Griffin S, Shen A, et al. Systematic comparison between a wireless EEG system with dry electrodes and a wired EEG system with wet electrodes [J]. *Neuroimage*, 2019, 184: 119-129. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2018.09.012.
 - [46] Colamarino E, Pichiorri F, Toppi J, et al. Automatic selection of control features for electroencephalography-based brain-computer interface assisted motor rehabilitation: the GUIDER algorithm [J]. *Brain Topogr*, 2022, 35(2): 182-190. DOI: 10.1007/s10548-021-00883-9.

(修回日期: 2022-09-23)

(本文编辑: 易 浩)