·专栏·

功能性电刺激“环路干预”模式在脑卒中手功能康复中的研究进展

王语纯[1] 陈树耿[1*] 贾杰[1,2,3]

［1.复旦大学附属华山医院康复医学科，上海 200040；2.国家老年疾病临床医学研究中心（华山），上海 200040；
3.国家神经疾病医学中心，上海 200040］

【摘要】 脑卒中患者手功能康复“环路干预”基于“中枢–外周–中枢”闭合环路，通过有机融合中枢干预与外周干预，构建“闭环”式信息反馈，精准作用于患者特定或功能相关脑区。该模式以大脑可塑性和神经通路重塑为基础，充分发挥“外周干预”与“中枢干预”的互补功能，直击脑损伤后皮质功能改变的关键问题，有效促进中枢重塑和外周控制，提高患者手功能。功能性电刺激（Functional Electrical Stimulation，FES）有多种外周干预模式，如联动 FES、任务导向训练 FES、实时 FES 等，其常见组合使用的中枢干预方法有重复经颅磁刺激、经颅直流电刺激、脑机接口等，二者结合形成“环路干预”模式。“环路干预”致力于为临床脑卒中患者手功能康复提供更具成效的治疗方案，对于提升患者日常生活活动能力、改善生活质量意义具有很好的应用价值，有望切实改善脑卒中患者康复现状，具有深远的社会价值。

【关键词】 手功能；功能性电刺激；外周干预；中枢干预；脑卒中

【中图分类号】 TH77; R49 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202501002

Research progress of functional electrical stimulation–based 'Loop Intervention' model in hand function rehabilitation after stroke

Wang Yuchun[1], *Chen Shugeng*[1*], *Jia Jie*[1,2,3]

［*1. Department of Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China; 2. National Clinical Research Center for Geriatric Diseases (Huashan), Shanghai 200040, China; 3. National Center for Neurological Diseases, Shanghai 200040, China*］

【Abstract】 The ‘loop intervention’ for the hand function rehabilitation of stroke patients is based on the ‘central–peripheral–central’ closed loop. By organically integrating central intervention and peripheral intervention, it constructs a ‘closed–loop’ information feedback system, which precisely acts on the specific or functionally related brain regions of patients. This model is based on brain plasticity and the remodeling of neural pathways, giving full play to the complementary functions of ‘peripheral intervention’ and ‘central intervention’. It directly addresses the key issue of the change in cortical function after brain injury, effectively promoting central remodeling and peripheral control, and improving the hand function of patients. Functional electrical stimulation (FES) has various peripheral intervention modes, such as linked FES, task–oriented training FES, real–time FES, etc. The commonly combined central intervention methods include repetitive transcranial magnetic stimulation, transcranial direct current stimulation, brain–computer interface, etc. The combination of the two forms the ‘loop intervention’ model. The ‘loop intervention’ is committed to providing a more effective treatment plan for the hand function rehabilitation of clinical stroke patients. It has great application value in improving patients' ability to perform daily activities and their quality of life. It is expected to effectively improve the rehabilitation status of stroke patients and has far–reaching social value.

【Key words】 Hand function; Functional electrical stimulation; Peripheral intervention; Central intervention; Stroke

基金项目：国家自然科学基金资助项目（82202798）；上海扬帆专项（22YF1404200）

第一作者：王语纯，女，硕士研究生在读，研究方向：脑机接口与神经康复

通讯作者：陈树耿，男，博士，研究方向：脑机接口与神经康复

脑卒中患者常出现手功能障碍，在临床康复治疗过程中，手功能恢复存在进程缓慢、难度较大、效果欠佳等问题，这成为脑卒中后功能障碍康复的一大重点和难点。并且，手功能的康复状况在很大程度上能够反映患者整体的康复程度[1,2]。在人体中，相较于其他部位，手在大脑皮层的投射区域更大。例如支配指腕关节肌群的α运动神经元与皮质脊髓束之间具有大量的单突触联系[2,3]，一旦受损，大脑皮层的重塑过程极其漫长，这使得手功能的恢复变得极其困难。

功能性电刺激（Functional Electrical Stimulation，FES）在脑卒中功能障碍的康复中应用广泛[4]。研究报道，功能性电刺激能有效提高脑卒中患者的手部功能，增强患者的抓握能力[5]，提高日常生活活动能力[6]，进而整体提升其生活质量（Quality Of Life，QOL）。上肢FES与肢体的主动运动训练相结合，对患侧肢体运动功能的改善更加明显[7]。改进的FES，能够更有效地使脑卒中患者在进行手张开活动时的触碰模式趋于正常化，进而更加有利于其手部功能的实现[8]。

FES刺激信号的控制问题依旧制约着其发展[9]，现有的刺激模式难以实时根据患者意愿进行肢体运动控制，影响治疗效果。虽然各种干预模式单独或组合应用有一定成效[10]，但对于如何更精准地协同外周与中枢干预，充分发挥两者优势，形成高效的康复治疗体系，仍缺乏深入研究。鉴于此，基于“中枢–外周–中枢”闭合环路的手功能康复模式是必要的，将外周功能性电刺激与中枢干预有机融合，构建“闭环”式信息反馈，可以精准作用于患者特定或功能相关脑区，其基本原理在于利用大脑的可塑性和神经通路的重塑能力[11]。脑卒中后中枢神经系统虽受损，但仍具备功能重组的潜力。外周干预通过FES刺激神经肌肉[12]，产生运动信号反馈至大脑，激活患侧脑区；中枢干预则直接作用于大脑，调节皮质兴奋性和神经可塑性，两者相互配合，形成良性循环，促进大脑功能重塑。

1 功能性电刺激的外周干预研究进展

1.1 联动FES

研究表明，双侧运动训练在效果上明显优于单侧训练[13–15]。这主要是因为当双侧肢体的同源性肌肉开展对称性运动时，两侧大脑半球相似的神经网络都会被激活[15]，同时皮质间的抑制作用会减弱[16]，这种变化促使患者的神经功能得以重新组合。同理，在对脑卒中患者的手部实施功能性电刺激治疗时，将对患侧手的电刺激与健侧手相结合，达成双手刺激信号的同步，能够产生类似双侧运动训练的效果。

沈滢[17]等开展研究，采用对侧控制型功能性电刺激（Contralaterally Controlled Functional Electrical Stimulation，CCFES）探究其对脑卒中后上肢及手功能恢复的作用。研究将患者随机分为CCFES组和对照组，两组均接受常规康复训练，对照组对患侧上肢使用神经肌肉电刺激（Neuromuscular Electrical Stimulation，NMES）。3周治疗后，两组上肢Fugl–Meyer assessment（FMA）评分、上肢运动力指数（Motricity Index，MI）较治疗前提升（$P<0.05$），且CCFES组的评分高于对照组（$P<0.05$）。该研究表明，CCFES有助于促进脑卒中患者上肢及手功能恢复，效果优于常规NMES。

联动功能性电刺激有效利用了一侧肢体的肌肉活动信号，实现双侧电刺激的同步产生，在脑卒中患侧手恢复中具有创新性，可作为FES治疗的一种新模式而被应用于临床康复当中。

1.2 任务导向训练FES

任务导向训练是基于运动控制及运动学习理论系统模型原理，在患者主动参与康复训练的前提下，根据患者的功能缺陷与不足，针对日常生活活动（Activity of Daily Life，ADL）所需功能设计主动运动训练[18]，并最终实现患者运动功能恢复的一种治疗方法。有研究[19]通过设计如拿起并放下杯子、端杯喝水等贴近生活的训练项目，将训练与日常生活活动相结合，具有一定的目的性与功能性。而通过这一形式下的反复练习，能形成一种正反馈，有效避免了患者上肢及手的废用或误用[1]。

任务导向的功能性电刺激[20]将双侧运动、重复训练与功能性电刺激相结合，取得初步成果。在电刺激时，患者用患肢完成如拿杯子、翻书等功能性活动，通过健侧手指控制FES开关，完成抓握

与放下动作，以此发挥最佳治疗效果。研究[21]表明，任务导向训练结合FES，对脑卒中患者手功能恢复效果优于单纯FES。一项随机对照研究[16]显示，经12周任务针对性FES治疗，患者患侧手功能测试和FMA评分显著提高，说明FES结合任务导向训练能有效改善脑卒中患者患侧上肢及手的运动功能。

1.3 实时FES与基于肌电生物反馈的FES

近年来，基于模型控制的FES在提升功能性够及任务精确性上极具潜力[22]，但通常依赖参考轨迹。有研究把功能性任务的计算机运动控制模型嵌入实时FES控制计划，摆脱了预设参考轨迹的限制。该方法通过重复利用运动学变量优化，转化为重复学习控制算法，替代实验获取的刺激信号，一定程度上实现了实时控制FES开展正常辅助任务活动的功能[23]。研究[4]证明，结合合适优化程序的上肢模型，能精准预测人类运动活动，即功能性活动可通过优化问题嵌入FES，辅助临床任务，且无需收集新动作信息。这种基于FES的新康复治疗方式有望用于临床。

另外，相关研究也[24]提示实时精确的FES更利于促进大脑皮质重塑，此目标可借助肌电生物反馈（Electromyographic Biofeedback，EMGBFB）实现。EMGBFB以肌电信号为反馈产生刺激，助力肌肉功能恢复，在脑卒中后手功能障碍患者中应用广泛。它常与电刺激尤其是功能性电刺激同步，让患者接受实时反馈刺激训练，最大化恢复肌肉功能。

Ambrosini等[25]开展单盲多中心随机对照试验，将72例脑卒中患者分为两组，实验组接受基于集成肌电图触发功能性电刺激的被动外骨骼辅助训练30 min加60 min先进传统疗法（Advanced Conventional Therapy，ACT），对照组接受90min ACT，训练9周。结果显示，除生活质量量表评分外，两组各项指标均改善；实验组在行动研究上肢动作研究量表（Action Research Arm Test，ARAT）和盒子和方块测试（Box & Block Test，BBT）上优势显著，组间变化更优，患者认为RETRAINER可用性中等。研究表明，RETRAINER辅助训练在改善手臂功能和灵活性上优于ACT，但在提升日常生活活动能力和生活质量方面存在局限。

应用FES合并肌电生物反馈的治疗方式可提高脑卒中患者的肢体功能性活动。有研究[26]将肌电生物反馈的FES结合镜像疗法进行脑卒中后患者的治疗，与单纯的FES结合镜像疗法（Mirror therapy，MT）组和对照组相比，通过徒手肌力测试和关节活动度测试发现手背伸功能得到提高（$P<0.05$），以及在BBT、Jabsen Taylor手功能测试（Jabsen Taylor Hand Function Test，JHFT）和脑卒中特定生活质量量表（Stroke Specific Quality of Life，SSQOL）等量表评定结果发现都与其他两组具有统计学差异，从而也证明了肌电生物反馈的FES在脑卒中手功能障碍康复中的有效性。

Wang[27]等提出MT结合FES训练法，用表面肌电图（surface Electromyography，sEMG）识别一侧运动，控制另一侧FES，同时运用镜像疗法，通过分析感觉运动皮层活动变化验证效果，证实FES联合MT对大脑感觉运动皮层有明显激活作用。

Kim等[28]研究表明，有效的MT能与神经肌肉电刺激或肌电图（Electromyogram，EMG）触发的生物反馈结合。参与者在健侧上肢前臂佩戴基于肌电图技术的手势识别臂带，检测肌电图信号，捕捉手腕屈伸肌肉收缩信号，经蓝牙传至接收器，转化为输出信号发送至FES设备。FES设备2个通道的电极垫分别连在控制手腕屈伸的肌肉上。结果显示，使用手势识别生物反馈的基于FES的MT，能促进慢性脑卒中患者上肢运动恢复，改善运动功能。

2 功能性电刺激联合中枢干预的研究进展

FES常见组合的中枢干预方式如图1，有脑机接口、经颅直流电刺激、重复经颅磁刺激等，在应用时各有侧重。

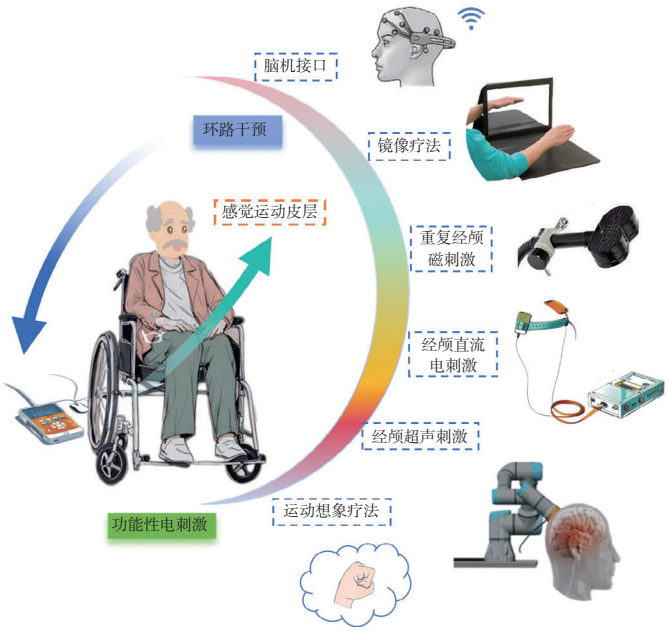


图 1 环路干预 -- 中枢协同外周 FES 干预新模式

注：此图展示了针对脑卒中患者（以坐轮椅老人为例）的 FES 环路干预体系。中枢通过脑机接口、镜像疗法、重复经颅磁刺激、经颅直流电刺激、经颅超声刺激、运动想象疗法等多种方式对感觉运动皮层进行干预，外周结合功能性电刺激形成闭环，促进患者手功能康复。

2.1 FES联合重复经颅磁刺激

重复经颅磁刺激是将磁刺激重复施加在特定大脑功能区域的中枢干预手段。彭源等[29]将 32 例脑卒中上肢手功能障碍患者分为三组，在均接受常规康复训练的基础上，一组采用重复经颅磁刺激（repetitive Transcranial Magnetic Stimulation，rTMS）刺激患侧大脑运动皮质区（Motor cortex，M1），再进行患侧上肢的 FES 治疗，一组进行 FES 治疗但不进行 rTMS 预刺激，还有一组作为对照组。所应用的 FES 主要针对患者患侧上肢的腕背伸肌群及拇指外展肌群进行相应刺激。经过 2 ~ 4 周的治疗，3 组的上肢 FMA 评分及改良 Barthel 指数（Modified Barthel Index，MBI）评分均有所提高，而其中的 FES 联合 rTMS 组得分比 FES 组高（$P<0.01$），证明 FES 的疗效在增加 rTMS 预刺激后能得到进一步的增强。

激活剂量的 rTMS 作用于患侧半球[29]或者抑制剂量的 rTMS 作用于对侧半球[30]或者两种方式的结合在脑卒中运动功能障碍的恢复中具有一定疗效[31]。而将这一中枢干预模式与 FES 进行结合，能使 FES 的效果得到更大的发挥。

2.2 FES联合经颅直流电刺激

经颅直流电刺激（transcranial Direct Current Stimulation，tDCS）作为一种中枢神经系统层面的脑调控治疗方法，促进肌肉电信号控制能力的提升，并诱导皮质兴奋性的改变与神经可塑性变化[32]，其被证明能提高正常人运动学习能力，同时也适用于脑卒中运动功能障碍患者康复治疗[33]。FES 能激活瘫痪肌肉来辅助脑卒中患者功能运动，而通过残存 EMG 的触发 FES 可能促进感觉运动整合。脑卒中后患者肌肉活动经常出现启动与终止的延迟，而通过在中枢神经系统水平的 tDCS 这一辅助性治疗能减小这一延迟，并促进运动再学习过程和维持正常的肌肉激活模式[34]，这提示了 FES 结合 tDCS 进行脑卒中手功能康复治疗的意义所在。

在临床应用领域[34]，对大脑 M1 区施加阳极 tDCS 后，肌肉活动的启动延迟得以降低。这一结果表明，阳极 tDCS 可能有助于治疗脑卒中后遗留肌肉激活障碍或延迟问题的患者。因此，将 tDCS 作为辅助手段，能够促进适宜的肌电以触发功能性电刺激，避免因肌肉活动延迟导致的反馈信号异常，进而保障实时功能性任务的顺利开展。另外，作为与 FES 结合的

辅助性治疗方法的tDCS还通过提高脑卒中后患者的肌肉募集与协调能力，提升患者的ADL能力[35–38]。

TDCS通过提高大脑皮质的兴奋性，促进半球间的兴奋性平衡，为脑功能重组创造有利条件，而FES通过促使患肢反复主动运动，强化感觉与运动对中枢的正反馈，促进脑卒中后神经通路重建。二者形成双重刺激协同作用，进一步促进脑卒中患者脑神经功能重塑，进而促进上肢手运动功能的改善[39]。

2.3 FES联合脑机接口

脑机接口（Brain Computer Interface，BCI）是大脑与计算机或外界设备的联系通路[40]。有研究[41–44]表明，FES能促进大脑皮层朝着正常化募集，而BCI–FES则在促进大脑皮层正常化方面比单纯FES更具优势[45]。BCI能够激活患者双侧大脑半球，显著增强大脑感觉运动皮质的事件相关去同步化，同时激活感觉运动皮质和顶叶皮质[22,46]。先进智能康复系统[47]能绕过脑卒中患者中断或受损的神经通路，直接将人的运动意图经新路径传达给外界的FES设备，进而刺激相应神经肌肉，可有效恢复手部抓握功能。有BCI研究[48]对一名因慢性脑卒中导致手指肌肉瘫痪的患者，采用BCI联合FES治疗，经历3周，每周3次的训练后，测量发现部分手指的伸展功能有所恢复。另有研究[46]让健康者使用BCI与FES结合的可穿戴式手部设备，模拟脑卒中患者上肢手部障碍模式执行抓握水杯任务，通过EEG信号操控FES。结果显示，该BCI–FES系统在脑卒中患者手功能康复领域具备应用潜力。

Brunner等[49]将运动想象与视觉反馈和FES相结合的恢复性BCI应用于脑卒中后上肢功能严重受损的患者。实验组将运动想象与针对手指和手腕伸肌的FES相结合，对照组采用常规疗法。该研究旨探索改善脑卒中后亚急性期严重受损的上肢运动功能方面，一是脑机接口–功能性电刺激（Brain Computer Interface–Functional Electrical Stimulation，BCI–FES）是否比常规疗法更有效；二是皮质–脊髓道（Corticospinal Tract，CST）完整性保留的患者是否能从BCI训练中受益更多。研究结果显示，CST完整性是改善上肢运动功能的重要预测因子。同时，脑电图分析表明，患侧大脑半球的事件相关去同步化（Event Related Desynchronization，ERD）发生了显著变化，这种偏侧化仅在治疗结束时未受影响的上肢运动图像采集期间出现。

当把功能性电刺激与脑机接口系统相连时，患者的意图能直接引发肌肉收缩，形成一种自上而下/自下而上相耦合的循环周期，这会进一步促进大脑可塑性的提升[50]。在基于运动想象控制功能性电刺激系统的作用下，患者的外周和中枢系统可以被同步激活，进而有效促进上肢运动功能的恢复。

3 基于FES的“环路干预”模式在脑卒中手功能康复中的展望

FES在脑卒中患者手功能康复领域具有重要的临床应用意义。它不仅能促进肌肉收缩，更关键的特点是具有“功能性”，可促使患者手部实现“功能性提高”，以满足患者的日常活动活动需求，进而提升患者生活能力与生活质量[51]。

在中枢干预与FES结合方面，rTMS预刺激能进一步增强FES疗效。其中，tDCS–FES可降低肌肉活动启动延迟，促进运动再学习，提高肌肉募集与协调能力。TMS相比于tDCS，特点是能直接诱发躯体运动。BCI–FES能激活双侧大脑半球，促进大脑皮层正常化，提升手部抓握功能恢复效果。不过，这些中枢干预与FES结合的方式在临床应用的广泛性和长期效果稳定性上，仍有待进一步深入验证和提升其临床应用空间[52]。

基于FES的“环路干预”模式在脑卒中手功能康复领域前景广阔。鉴于中枢神经系统具有可塑性和功能重组能力[53]，且脑卒中后功能恢复与神经可塑性紧密相关，“环路干预”模式有望进一步优化。一方面，可以深入研究如何更精准地根据患者个体差异，制定个性化的“环路干预”方案，提高治疗的针对性和有效性。例如，通过更先进的技术手段监测患者大脑功能重塑过程，实时调整外周和中枢干预的参数[53]。另一方面，加强对各种干预方式联合应用的研究，探索不同干预方法之间的最佳组合方式和作用顺序，进一步提升康复效果。此外，随着科技的不断进步，可将更多新技术融入“环路干预”模式，如结合虚拟现实、人工智能等

技术[54]，为患者创造更具沉浸感和互动性的康复训练环境，提高患者的参与度和训练积极性[55]，从而更有效地推动脑卒中患者肢体功能尤其是手功能的恢复，切实改善脑卒中患者的康复现状，具有深远的社会价值。

[参 考 文 献]

[1] Sousa ASP, Mesquita IA, Costa da Silva CI, et al. Optimal multifield functional electrical stimulation parameters for the "turn on the light" task and related upper limb kinematics repeatability in poststroke subjects[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2021, 102(6):1180–1190.

[2] Yang Z, Qiao L, He J, et al. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation combined with functional electrical stimulation on hand function of stroke: A randomized controlled trial[J]. NeuroRehabilitation, 2022, 51(2):283–289.

[3] 郑芳芳,刘慧华,燕铁斌,等.功能性电刺激改善皮层下脑卒中患者上肢运动功能fMRI的对照研究[J].康复学报,2015,25(3):1–6.

[4] Jia J. Exploration on neurobiological mechanisms of the central – peripheral – central closed – loop rehabilitation[J]. Front Cell Neurosci, 2022, 16:982881.

[5] Khantan M, Avery M, Aung PT, et al. The nuroSleeve, a user – centered 3D printed hybrid orthosis for individuals with upper extremity impairment[J]. Neuroeng Rehabil, 2023, 20(1):103.

[6] 李建华,戴洁,吴涛,等.便携式上肢功能性电刺激器对脑卒中患者上肢功能即刻改善的影响[C]//浙江省医学会神经病学分会.2015年浙江省神经病学学术年会论文汇编.浙江大学医学院附属邵逸夫医院康复医学科;浙江大学医学院附属邵逸夫医院神经内科,2015:1.

[7] Höhler C, Hermsdörfer J, Jahn K, et al. The assistive potential of functional electrical stimulation to support object manipulation in functional upper extremity movements after stroke: A randomized cross – over study[J]. Cent Nerv Syst Dis, 2024, 16:11795735241247812.

[8] He S, Huang S, Huang L, et al. LiDAR – Based Hand Contralateral Controlled Functional Electrical Stimulation System[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2023, 31:1776–1785.

[9] Yakovlev L, Syrov N, Kaplan A, et al. Investigating the influence of functional electrical stimulation on motor imagery related μ – rhythm suppression[J]. Front Neurosci, 2023, 17:1202951.

[10] 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.

[11] 贾杰."中枢 – 外周 – 中枢" 闭环康复——脑卒中后手功能康复新理念[J].中国康复医学杂志,2016,31(11):1180–1182.

[12] Höhler C, Wild L, de Crignis A, et al. Contralaterally EMG – triggered functional electrical stimulation during serious gaming for upper limb stroke rehabilitation: a feasibility study[J]. Front Neurorobot, 2023, 17:1168322.

[13] Kapadia N, Moineau B, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for retraining reaching and grasping after spinal cord injury and stroke[J]. Front Neurosci, 2020, 14:718.

[14] 赵宗敏.提高脑卒中偏瘫康复疗效中应用双侧肢体功能训练的效果分析[J].中外医疗,2020,39(18):50–52+58.

[15] Hung CS, Lin KC, Chang WY, et al. Unilateral vs bilateral hybrid approaches for upper limb rehabilitation in chronic stroke: A randomized controlled trial[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2019, 100(12):2225–2232.

[16] Renner CIE, Hummelsheim H. Response: Bilateral arm training vs unilateral arm training for severely affected patients with stroke: Comments on exploratory single – blinded randomized controlled trial[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2021, 102(6):1237–1238.

[17] 沈滢,殷稚飞,戴文骏,等.对侧控制型功能性电刺激对脑卒中患者上肢功能的影响[J].中国康复医学杂志,2014,29(12):1119–1123+1184.

[18] da Silva PB, Antunes FN, Graef P, et al. Strength training associated with task – oriented training to enhance upper – limb motor function in elderly patients with mild impairment after stroke: a randomized controlled trial[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2015, 94(1):11–19.

[19] 蔡琛,杨宁,孙晓东,等.肌电生物反馈联合任务导向性训练对偏瘫上肢功能障碍患者的影响[J].中国实用神经疾病杂志,2020,23(7):602–606.

[20] Hedman LD, Sullivan JE, Hilliard MJ, et al. Neuromuscular electrical stimulation during task – oriented exercise improves arm function for an individual with proximal arm dysfunction after stroke[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2007, 86(7):592–596.

[21] Carrico C, Westgate PM, Salmon Powell E. Nerve stimulation enhances task – oriented training for moderate – to – severe hemiparesis 3 – 12 months after stroke: A randomized trial[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2018, 97(11):808–815.

[22] Remsik AB, van Kan PLE, Gloe S, et al. BCI – FES with multimodal feedback for motor recovery poststroke[J]. Front Hum Neurosci, 2022, 16:725715.

[23] Bala S, Vishnu VY, Joshi D. MEFFNet: Forecasting myoelectric indices of muscle fatigue in healthy and post – stroke during voluntary and fes – induced dynamic contractions[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32:2598–2611.

[24] Tsaih PL, Chiu MJ, Luh JJ, et al. Practice variability combined with task – oriented electromyographic biofeedback enhances strength and balance in people with chronic stroke[J]. Behav Neurol, 2018, 2018:7080218.

[25] Ambrosini E, Gasperini G, Zajc J, et al. A robotic system with emg – triggered functional eletrical stimulation for restoring arm functions in stroke survivors[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2021, 35(4):334–345.

[26] Kim JH, Lee BH. Mirror therapy combined with biofeedback functional electrical stimulation for motor recovery of upper extremities after stroke: a pilot randomized controlled trial [J] . Occup Ther Int, 2015, 22(2):51–60.

[27] Wang YX, Luo ZZ. Research on the effect of MT+ FES training on sensorimotor cortex [J] . Neural Plast, 2022, 2022:6385755.

[28] Kim YS, Song JY, Park SH, et al. Effect of functional electrical stimulation – based mirror therapy using gesture recognition biofeedback on upper extremity function in patients with chronic stroke: A randomized controlled trial [J] . Medicine (Baltimore), 2023, 102(52):e36546.

[29] 彭源,陈康,张瑾,等.rTMS预刺激结合FES对脑梗死患者偏瘫上肢功能的影响 [J] .中国康复,2015,30(2):112–113.

[30] Lüdemann–Podubecká J, Bösl K, Rothhardt S, et al. Transcranial direct current stimulation for motor recovery of upper limb function after stroke [J] . Neurosci Biobehav Rev, 2014, 47:245–259.

[31] Li D, Cheng A, Zhang Z, et al. Effects of low – frequency repetitive transcranial magnetic stimulation combined with cerebellar continuous theta burst stimulation on spasticity and limb dyskinesia in patients with stroke [J] . BMC Neurol, 2021, 21(1):369.

[32] Hu J, Hua Y, Li C, et al. Resting – state functional magnetic resonance imaging reveals the effects of rTMS on neural activity and brain connectivity after experimental stroke [J] . CNS Neurosci Ther, 2024, 30(11):e70104.

[33] Fan J, Voisin J, Milot MH, et al. Transcranial direct current stimulation over multiple days enhances motor performance of a grip task [J] . Ann Phys Rehabil Med, 2017, 60(5):329–333.

[34] Damercheli S, Morrenhof K, Ahmed K, et al. Performance in myoelectric pattern recognition improves with transcranial direct current stimulation [J] . Sci Rep, 2024, 14(1):11744.

[35] Wang J, Wu D, Cheng Y, et al. Effects of transcranial direct current stimulation on apraxia of speech and cortical activation in patients with stroke: A randomized sham – controlled study [J] . AJSLP, 2019, 28(4):1625–1637.

[36] Butler AJ, Shuster M, O’Hara E, et al. A meta – analysis of the efficacy of anodal transcranial direct current stimulation for upper limb motor recovery in stroke survivors [J] . Hand Ther, 2013, 26(2):162–170,171.

[37] Kristensen MGH, Busk H, Wienecke T. Neuromuscular electrical stimulation improves activities of daily living post stroke: A systematic review and Meta – analysis [J] . Arch Rehabil Res Clin Transl, 2022, 4(1):100167.

[38] Schlaug G, & Renga V. Transcranial direct current stimulation: a noninvasive tool to facilitate stroke recovery [J] . Expert Rev Med Devices, 2008, 5 (6):759–768.

[39] 陈甜甜,徐东平,孙凤宝,等.经颅直流电刺激联合对侧控制型功能性电刺激对脑卒中患者上肢功能的效果 [J] .中国康复理论与实践,2023,29(5):527–532.

[40] Xie YL, Yang YX, Jiang H, et al. Brain – machine interface – based training for improving upper extremity function after stroke: A meta – analysis of randomized controlled trials [J] . Front Neurosci, 2022, 16:949575.

[41] Xu S, Li C, Wei C, et al. Closed – loop wearable device network of intrinsically – controlled, bilateral coordinated functional electrical stimulation for stroke [J] . Adv Sci (Weinh), 2024, 11(17):e2304763.

[42] Dong Y, Wang K, He R, et al. Hybrid and adaptive control of functional electrical stimulation to correct hemiplegic gait for patients after stroke [J] . Front Bioeng Biotechnol, 2023, 11:1246014.

[43] Hammelef E, Zakaria SJ, Andersen SH,et al. A pilot feasibility trial of an upper extremity assistive system [J] . Arch Rehabil Res Clin Transl, 2023, 5(4):100308.

[44] Choi I, Kwon GH, Lee S, et al. Functional electrical stimulation controlled by motor imagery brain – computer interface for rehabilitation [J] . Brain Sci, 2020, 10(8):512.

[45] Fu J, Chen S, Jia J. Sensorimotor rhythm – based brain – computer interfaces for motor tasks used in hand upper extremity rehabilitation after stroke: A systematic review [J] . Brain Sci, 2022, 13(1):56.

[46] Remsik AB, Gjini K, Williams L Jr, et al. Ipsilesional Mu rhythm desynchronization correlates with improvements in affected hand grip strength and functional connectivity in sensorimotor cortices following BCI – FES intervention for upper extremity in stroke survivors [J] . Front Hum Neurosci, 2021, 15:725645.

[47] Le Guillou R, Froger J, Morin M, et al. Specifications and functional impact of a self – triggered grasp neuroprosthesis developed to restore prehension in hemiparetic post – stroke subjects [J] . Biomed Eng Online, 2024, 23(1):129.

[48] Daly JJ, Cheng R, Rogers J, et al. Feasibility of a new application of noninvasive Brain Computer Interface (BCI): a case study of training for recovery of volitional motor control after stroke [J] . Neurol Phys Ther, 2009, 33(4):203–211.

[49] Brunner I, Lundquist CB, Pedersen AR, et al. Brain computer interface training with motor imagery and functional electrical stimulation for patients with severe upper limb paresis after stroke: a randomized controlled pilot trial [J] . Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1):10.

[50] Hara Y. Brain plasticity and rehabilitation in stroke patients [J] . Nippon Med Sch, 2015, 82(1):4–13.

[51] 燕铁斌.神经肌肉电刺激改善脑卒中早期患者运动功能的临床及应用基础系列研究 [R] .广东:中山大学, 2011–12–14.

[52] Quandt F, Hummel FC. The influence of functional electrical stimulation on hand motor recovery in stroke patients: A review [J] . Exp Transl Stroke Med, 2014, 6:9.

[53] 周鹏,曹红宝,熊屹,等.基于脑机接口的智能康复系统的设计 [J] .计算机工程与应用,2007,44(26):1–4.

[54] Guggenberger R, Heringhaus M, Gharabaghi A. Brain – machine neurofeedback: robotics or electrical stimulation? [J] . Front Bioeng Biotechnol, 2020, 8:639.

[55] Said RR, Heyat MBB, 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.