

# 脑机接口在卒中运动康复中的研究进展与临床转化

张 扬<sup>1,2</sup>, 赵 莹<sup>1</sup>, 何宗英<sup>2</sup>, 王秋水<sup>2</sup>, 高 霞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>昆明医科大学第二附属医院康复医学部, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省曲靖中心医院康复医学科, 云南 曲靖

收稿日期: 2026年1月16日; 录用日期: 2026年3月12日; 发布日期: 2026年3月20日

## 摘 要

脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术在卒中患者运动康复中的应用展现出良好的发展前景, 并被认为是一种有潜力改善功能结局的创新性干预手段。现有临床研究表明, BCI训练能够显著改善卒中后患者的运动功能表现, 尤其在上肢运动控制和功能恢复方面显示出积极效果。与此同时, BCI训练在临床应用中具有良好的安全性和耐受性。来自单组研究及部分对照研究的证据整体一致, 支持BCI在提升卒中患者运动表现和促进功能恢复方面的有效性。这些研究结果为BCI在康复领域的应用提供了重要的初步依据。尽管短期疗效较为明确, 关于BCI干预长期效果的证据仍然相对有限。在评估BCI训练效果时, 还必须充分考虑不同BCI训练范式之间的差异, 因为不同的信号来源、解码策略和反馈形式可能对功能恢复产生不同影响。本综述重点讨论了多种常见的BCI训练模式, 包括基于运动想象的脑机接口、基于运动尝试的脑机接口以及基于感觉运动节律的脑机接口。这些范式在神经激活机制、训练方式和适用人群方面各具特点, 及其潜在临床获益及当前面临的主要挑战。将脑机接口(BCI)与其他康复设备或技术相结合, 有望进一步增强康复效果。通过构建闭环反馈系统, 这类联合干预策略能够更有效地促进神经可塑性变化, 并将神经活动的调控转化为有意义的功能改善, 从而提升康复训练的针对性和效率。

## 关键词

脑机接口(BCI), 中风康复, 上肢功能, 神经康复, 运动功能恢复, 运动想象

# Research Progress and Clinical Translation of Brain-Computer Interface in Stroke Motor Rehabilitation

Yang Zhang<sup>1,2</sup>, Ying Zhao<sup>1</sup>, Zongying He<sup>2</sup>, Qiushui Wang<sup>2</sup>, Xia Gao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan

文章引用: 张扬, 赵莹, 何宗英, 王秋水, 高霞. 脑机接口在卒中运动康复中的研究进展与临床转化[J]. 生物医学, 2026, 16(2): 296-306. DOI: 10.12677/hjbm.2026.162031

<sup>2</sup>Department of Rehabilitation Medicine, Qujing Central Hospital of Yunnan Province, Qujing Yunnan

Received: January 16, 2026; accepted: March 12, 2026; published: March 20, 2026

## Abstract

The application of brain-computer interface (BCI) technology in motor rehabilitation of stroke patients shows good development prospects and is considered an innovative intervention method with the potential to improve functional outcomes. Existing clinical research shows that BCI training can significantly improve the motor function performance of post-stroke patients, especially showing positive effects in upper limb motor control and functional recovery. At the same time, BCI training has good safety and tolerability in clinical applications. The evidence from single-group studies and some controlled studies is generally consistent, supporting the effectiveness of BCI in improving exercise performance and promoting functional recovery in stroke patients. These research results provide important preliminary basis for the application of BCI in the field of rehabilitation. Although short-term efficacy is clear, evidence on the long-term effects of BCI intervention is still relatively limited. When evaluating the effects of BCI training, the differences between different BCI training paradigms must also be fully considered, because different signal sources, decoding strategies, and feedback forms may have different effects on functional recovery. This review focuses on a variety of common BCI training modalities, including motor imagery-based BCI, motor attempt-based BCI, and sensorimotor rhythm-based BCI. These paradigms have their own characteristics in terms of neural activation mechanisms, training methods and applicable populations, as well as their potential clinical benefits and major current challenges. Combining brain-computer interfaces (BCI) with other rehabilitation equipment or technologies is expected to further enhance rehabilitation effects. By building a closed-loop feedback system, this type of joint intervention strategy can more effectively promote neuroplastic changes and transform the regulation of neural activity into meaningful functional improvements, thereby improving the pertinence and efficiency of rehabilitation training.

## Keywords

Brain-Computer Interface (BCI), Stroke Rehabilitation, Upper Limb Function, Neurological Rehabilitation, Motor Function Recovery, Motor Imagery

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

中风是全球主要致残原因之一，常遗留偏瘫及多种功能障碍[1]。受病理机制复杂及功能缺损异质性影响，现有康复技术的疗效稳定性有限，整体恢复过程缓慢，通常需要长期、持续且高依从性的治疗投入[2][3]。脑机接口(brain-computer interface, BCI)作为新兴神经工程技术，近年来在卒中康复领域受到关注；越来越多研究提示，BCI可通过增强患者主动参与、提供闭环反馈并促进神经可塑性，从而改善卒中后的运动功能结局[4]-[6]。

BCI本质上是连接脑信号与输出设备的闭环系统，其目标在于支持、扩展或恢复感觉-运动能力[7]。在运动康复场景中，系统采集与运动意图相关的脑活动并进行解码，将其转换为控制指令以驱动外部装

置或提供可感知的训练反馈[8]。按侵入性程度, BCI 可分为无创、部分侵入与侵入式。无创 BCI 多采用脑电图(EEG)、脑磁图(MEG)或功能性近红外光谱(fNIRS)获取脑信号, 安全便捷、便于推广, 但空间分辨率受限; EEG 具毫秒级时间分辨率但空间定位受颅骨与体积传导影响, MEG 在定位精度上通常更优, fNIRS 受血流动力学限制而时间分辨率较低[9] [10]。部分侵入式的皮层脑电图(EECoG)可在不穿透脑组织的情况下获得更高质量信号[11]; 全侵入式微电极阵列可记录单元活动并实现更高信噪比与分辨率, 但伴随更高的手术风险与长期并发症可能[12]。总体而言, 无创方案更具临床可接受性, 侵入式方案虽有解码优势但面临安全与伦理挑战[13]。当前临床研究与应用最广泛的是 EEG-BCI, 主要因设备要求较低、成本相对可控且部署便利[14]。

在信号与控制层面, EEG-BCI 可利用事件相关电位(ERP)及神经振荡的事件相关变化, 尤其是事件相关去同步化(ERD)与事件相关同步化(ERS), 实现意图识别与输出控制; 多模态 BCI 通过整合多源信号以提升控制稳定性并拓展应用场景[15]。值得强调的是, BCI 不仅用于替代或辅助受损运动功能[16], 其训练过程本身亦可诱导神经可塑性改变[17], 因此既可服务于康复干预, 也可用于探索脑功能重组机制[18]。在卒中康复中, BCI 通过与皮层活动的直接交互及闭环反馈, 有望促进运动技能改善; 同时可驱动机械臂、功能性电刺激等外部设备, 提供即时反馈并增强训练的针对性与可迁移性[19] [20]。

## 2. 脑机接口(BCI)训练方案

### 2.1. 基于运动想象的脑机接口

基于运动想象的脑机接口(MI-BCI)训练是卒中后康复中应用最为常见的范式之一。该方法的理论基础在于大脑能够在不产生实际运动输出的情况下, 对目标动作进行内部预演。当与特定动作相关的皮层区域受到来自其他区域的信号驱动时, 即使仅进行动作想象, 也可激活运动计划与执行所需的神经网络[1] [2]。MI-BCI 正是利用这一特性, 通过检测运动想象诱发的大脑活动, 并将其转化为发送给外部设备或响应系统的控制指令。对于无法主动运动或运动能力严重受限的患者而言, MI-BCI 在促进运动功能恢复方面具有突出的潜力[3]。在 MI-BCI 系统中, 通常采用脑电图(EEG)等非侵入性技术记录受试者脑活动, 随后由算法区分运动想象相关信号, 并输出相应的反馈或控制信号以实现闭环交互。在卒中康复实践中, MI-BCI 可帮助患者在自主控制受限的情况下仍产生运动效果, 例如引导患者想象移动手臂, 同时屏幕中的虚拟形象同步模拟手臂运动[4]。这种反馈回路不仅有助于强化运动学习, 也可提升信号解码与数据处理的准确性。已有研究显示, 在运动想象 BCI 任务中引入实时反馈, 可显著提高分类准确率, 例如从无反馈时约 60%提升至有反馈时约 80% [5] [6]。

多项研究进一步支持 MI-BCI 对卒中患者运动功能的促进作用。如卒中患者在接受运动想象脑机接口训练后, 手部与手臂的运动控制能力、力量及灵活性均有所改善[7]。另一项研究同样探索了 MI-BCI 在卒中康复中的应用, 结果提示, 与对照组相比, 采用该方法的患者运动功能获得更明显的提升。此外, 有研究发现卒中患者大脑中与运动功能相关的区域激活程度增加, 其可能发生了与训练相关的神经可塑性改变[8]。MI-BCI 在卒中康复中的效果可能与以下因素密切相关。心理练习通过动作想象并激活相关运动回路, 可诱导康复所需的神经可塑性变化[9]。患者可在训练过程中逐步优化运动想象策略, 从而提高心理练习的有效性。MI-BCI 能够依据患者具体损伤特点与康复目标进行个性化定制, 使训练更聚焦于关键的运动功能, 进而提升参与度、优化训练效率, 并最终获得更理想的康复结局[3]。

### 2.2. 基于运动尝试的脑机接口

卒中康复中另一类重要 BCI 范式为基于运动尝试的脑机接口(MA-BCI)。与基于运动想象(MI)的脑机接口强调想象动作不同, MA-BCI 主要针对患者在接收到指令后的运动尝试做出响应, 即使患者因功能

障碍而无法完成实际动作，系统仍可依据其努力或意图相关的脑信号进行识别与反馈[10]。

MA-BCI 的基本原理是检测与受试者运动意愿或努力相关的脑信号。以卒中患者尝试移动某一肢体为例，大脑皮层，尤其是运动皮层，可产生特定的电活动变化。MA-BCI 可通过脑电图(EEG)和/或脑磁图(MEG)等方式，或采用侵入式脑皮层图(ECoG)记录脑活动，并利用相应电极与信号处理流程识别这些特征信号。随后，这些脑信号被实时转换为控制指令，用于驱动机械臂、虚拟角色或其他电子系统。通过这种方式，MA-BCI 能够形成闭环控制过程，强化大脑对运动指令的表征，从而支持神经调控与运动学习[11]。在卒中康复应用中，MA-BCI 可依据患者努力程度提供反馈来促进功能恢复。如系统可指示患者抬起手臂，尽管患者实际抬臂困难，BCI 可控制机械臂完成对应动作，或在显示器上呈现抬臂的可视化结果。这种设计突出尝试而非成功执行，因此尤其适用于运动能力较弱的患者，帮助其完成更具意义且可持续的康复任务。研究表明，MA-BCI 能够显著改善卒中患者运动康复结局，并且在部分研究中显示其效果可能优于 MI-BCI。在接受 MA-BCI 训练的卒中患者人群中，已观察到较为明显的疗效，主要体现在手部与上肢运动改善方面[12]。一项系统性综述与荟萃分析进一步强调了基于 BCI 的康复对上肢功能的即时效果，结果提示中等效应量支持 MA-BCI 在改善运动技能方面具有优势[13]。

### 2.3. 基于感觉运动节律的脑机接口

卒中康复中另一种重要策略是基于感觉运动节律的脑机接口(SMR-BCI)。SMR-BCI 依赖与感觉运动功能相关的神经振荡模式来实现皮层再激活。大脑产生的电生理活动通常通过脑电图(EEG)或脑磁图(MEG)采集[14]。这些信号具有明显的振荡特征，可依据频率划分为不同脑节律。如  $\alpha$  节律(8~13 Hz)、 $\beta$  节律(13~30 Hz)以及  $\gamma$  节律(>30 Hz)。这些节律通常会受到任务执行的调节，并随个体行为状态与认知负荷而变化。SMR-BCI 利用大脑对这些节律进行内在调控的能力。系统检测节律调制模式，并将其转化为用于操作设备或提供反馈的控制信号。此类反馈不仅有助于提升对神经活动的自我控制能力，也可支持神经可塑性变化的形成与巩固。

在卒中康复中，SMR-BCI 通常通过鼓励患者主动激活相关皮层区域来促进运动功能恢复。尤其当 SMR-BCI 与神经反馈策略结合时，其效果更为突出：患者尝试调节自身脑活动，并接收视觉或听觉反馈以提示调节成功[15]。持续练习可逐步增强这些信号特征，并支持大脑中新连接的形成。对 SMR-BCI 训练结局的分析表明，该方法能够帮助卒中患者在一定程度上恢复受损功能[16]。此外，相关研究亦发现，SMR-BCI 训练可改善患者手部与手臂的运动控制能力，并伴随与运动功能相关脑区激活增强[17]。

## 3. 脑机接口与外部设备的结合

在基于脑机接口的卒中康复中，功能性电刺激(FES)、机器人外骨骼以及各类传感器等设备并非孤立的附加组件，而是闭环脑机接口系统不可或缺的组成部分。它们作为输出与反馈通道，依据对用户运动意图的解码结果，提供感觉或运动反馈，从而将中枢意图、外周输出与感觉回馈整合为可重复训练的闭环过程。该反馈机制对于强化神经可塑性变化、促进有效运动学习以及提升训练的目标导向性至关重要。因此，多种外部装置与 BCI 的集成不仅是技术层面的延伸，更是构建可落地、可推广脑机接口康复方案的关键要素。

### 3.1. 功能性电刺激(FES)

功能性电刺激(functional electrical stimulation, FES)通过向周围神经或肌肉施加电脉冲诱发肌肉收缩，从而产生具有实际意义的功能性运动，是卒中后运动康复的重要辅助手段[18]。在此基础上，脑机接口(BCI)可解码患者的运动意图或运动努力，并触发相应的 FES 刺激，使外周肌肉活动与中枢运动指令相匹配，从而构建中枢 - 外周耦合的闭环反馈系统，增强运动皮层激活并促进神经可塑性[19] [20]。在 BCI-

FES 集成方案中, 脑信号被实时转换为目标肌群的刺激指令, 在神经冲动与可见运动之间建立可训练的映射关系, 从而支持肢体再学习与运动控制恢复。BCI-FES 系统的关键技术挑战在于解码与刺激之间的时序同步。现有系统中, 从意图检测到肌肉刺激的延迟通常约为 100~500 ms, 取决于信号处理流程与通信链路[21]。过大的延迟可能削弱感觉 - 运动反馈的因果关联, 影响训练效果与神经可塑性巩固。为此, 可通过优化实时算法、引入预测性解码模型及定期系统校准, 以降低延迟并维持解码稳定性[22]。

临床研究表明, BCI-FES 可用于恢复或重建抓握、搬运及步行等功能性动作, 使康复训练更贴近真实生活场景[23]。该方法既适用于康复早期, 也可作为亚急性期和慢性期的重要干预手段, 不仅有助于改善运动控制, 还可维持肌肉量并减轻去神经支配相关的不良改变[24]-[27]。综合分析显示, 与单独应用 BCI 或 FES 相比, BCI-FES 在改善运动功能、提高皮层活动效率及增强神经可塑性方面可能具有优势, 且其功能结局优于单纯传统康复治疗[28] [29]。

### 3.2. 机器人外骨骼

外骨骼是一类可穿戴机器人设备, 可连接于人体以增强、辅助或替代人体运动。其通常包括模拟四肢骨骼的机械框架、用于复制关节与肢体活动的关节结构, 以及用于固定与支撑肢体的支架系统[18]。在卒中康复中, 机器人外骨骼可用于实施高重复、基于功能任务的训练, 旨在增强运动学习过程并促进功能恢复[19] [20]。这类系统通常由动力装置驱动, 可支持运动的启动、引导与调节; 同时也可通过脑机接口(BCI)接收来自大脑的信号实现意图驱动。具体而言, BCI 提取与预期运动计划相关的信息, 并将其转换为控制外骨骼的指令, 从而实现受影响肢体的运动输出[21] [22]。

由脑机接口(BCI)控制的机器人训练, 旨在通过任务导向训练支持康复, 同时在训练过程中强化原始运动模式, 并对参与运动控制与协调的神经通路形成持续刺激与锻炼。研究表明, 与传统疗法相比, BCI 控制的外骨骼训练可能在改善上肢功能、步态以及日常生活活动能力方面具有优势[23]。在使用下肢外骨骼的机器人辅助步态训练研究中, 将 BCI 方案与传统疗法进行比较发现, 卒中患者的上肢运动控制、肌肉力量以及运动皮层激活均有所改善[24] [25]。此外, 部分研究亦报告卒中康复期间步速、步态不对称性及步态稳定性等指标出现改善趋势[26]。

### 3.3. 感觉反馈装置

感觉反馈装置的目标在于提供或补充缺失的感觉输入, 以改善卒中患者对运动及本体感觉系统的控制能力[27] [28]。此类反馈设备可由脑机接口(BCI)控制, 从而能够对患者运动相关信号做出及时响应[29]。这种闭环交互不仅提升了干预的准确性与效率, 还可能通过强化“意图 - 感觉回馈”的对应关系, 重新巩固参与运动控制与感觉处理的神经网络[30]。

在卒中康复场景中, 感觉反馈设备可用于增强运动学习、支持功能恢复, 并提高患者参与治疗性训练的积极性和持续性[31]。如触觉反馈界面能够模拟握持或与物体交互的感觉, 有助于训练需要精细运动技能或精准手部动作的任务; 振动触觉反馈则可作为本体感觉线索, 辅助患者感知肢体位置与运动状态[32]。虚拟现实(VR)系统与脑机接口(BCI)的结合, 可构建更沉浸的训练环境, 使患者以更高参与度完成康复活动; 这些系统可通过提供认知线索以及来自 VR 平台的视觉与听觉反馈来强化目标运动[33]。通过将 BCI 检测到的运动意图与感觉反馈紧密耦合, 此类装置不仅有助于增强神经可塑性变化, 也可促进康复收益向更真实、更具意义的功能性任务迁移与转化。

## 4. 脑机接口训练在卒中中的临床应用

### 4.1. 短期疗效的证据

多项临床研究表明, 卒中患者在接受脑机接口(BCI)训练后, 患肢使用能力可在较短时间内出现显著

改善。与训练前基线相比,BCI 干预在运动功能和功能表现方面总体呈现稳定的改善趋势[34]-[36],常通过 Fugl-Meyer 评估和方块积木测试等标准化工具进行量化[37] [38]。相关研究多采用随机对照试验、交叉设计或病例系列,并将 BCI 训练与常规康复或假反馈条件进行比较,以评估其真实干预效应[36]。

从机制上看,BCI 训练的疗效主要归因于其提供的实时闭环反馈。即时反馈使患者能够根据输出结果持续调整运动策略,强化训练的目标导向性和闭环特征,从而促进运动学习并诱导神经可塑性变化。通过反复激活与目标运动相关的皮层通路,BCI 训练可促成与功能改善一致的网络重塑,该过程符合赫布可塑性原则[39] [40]。BCI 反馈可通过视觉、听觉及触觉等多种感觉通道实现。视觉反馈将神经指令映射为可观察的肢体或光标运动,听觉反馈用于引导策略调整,触觉反馈则模拟真实物理交互,从而增强训练情境的真实性与沉浸感,并提高患者参与度。此外,BCI 训练在提升患者动机与依从性方面亦具有优势。相较于重复性较强的传统康复方式,BCI 提供了更具交互性的训练体验和即时成就反馈,有助于维持患者长期参与康复过程[41]。

## 4.2. 长期效应的证据

尽管脑机接口(BCI)训练已展现出较为一致的短期积极效果,但关于其长期效应的证据仍不完全一致,因此总体结论尚难以明确。该领域面临的一项重要挑战在于,许多研究采用横断面设计而非更严谨的纵向研究方法评估 BCI 的影响。横断面研究能够提供关于 BCI 训练即时获益的信息,但往往难以准确捕捉训练收益在更长时间范围内的维持程度、衰减规律或可能的迟发效应。

为弥补这一不足,部分纵向研究尝试在短期 BCI 干预结束后的特定时间点进行随访评估。这些研究结果在方向上令人鼓舞,但仍呈现一定不一致性与个体差异。Ramos Murguialday 等人(2019)对完成 BCI 训练的慢性卒中患者进行了为期 12 个月的随访,发现部分患者的运动功能改善可持续存在,而另一些患者则出现不同程度回落,这提示疗效持久性具有明显异质性,并可能受到病灶位置、基线严重程度以及对康复方案依从性等个体因素的影响[34]。Biasucci 等人(2018)同样报道,BCI-FES 训练可显著改善上肢运动功能,且在 6 个月随访时仍可保持显著改善,提示闭环神经反馈与电刺激结合可能更有利于形成相对持久的神经可塑性改变[35]。Ang 等人(2015)则观察到,在接受基于运动想象的 BCI 并结合机器人辅助治疗的卒中幸存者中,运动功能改善在干预后 3 个月仍可持续存在,提示 BCI 与其他疗法联合应用或有助于获得更持久的功能性收益[36]。

荟萃分析与系统评价为长期效应提供了进一步支持,同时也提醒应避免对不同研究条件下的结论进行过度概括。Zhang 等人(2024)在纳入 25 项随机对照试验的系统评价与荟萃分析中指出,尽管 BCI 训练能够改善上肢功能,但若缺乏持续干预,改善幅度可能出现停滞甚至趋于平台期,这提示较短且更密集的训练方案可能产生更明显效果,同时维持或强化训练可能对长期获益至关重要[37]。Liu 等人(2025)对系统评价的概述同样强调,尽管基于 BCI 的康复训练持续显示上肢功能获益,但长期疗效的证据基础仍较有限,因此需要开展更大样本、多中心研究,并采用标准化随访方案,以提高临床可靠性与推广应用价值[38]。Carvalho 等人(2019)进一步指出,BCI 训练能够诱导可测量的神经生理变化,提示存在长期可塑性的可能,但不同试验结果的差异也反映出方法学严谨性与结局指标一致性的重要性[39]。

长期结局差异的出现,可能源于多个相互交织的因素。患者层面的差异,包括年龄、卒中病程、基线运动严重程度、病灶特征、认知功能以及动机水平均可能显著影响 BCI 训练诱导并维持神经可塑性变化的效率。有证据提示,年龄较小、处于亚急性期以及初始损伤程度较高者可能获得更明显的相对获益[40]。与此同时,当前研究在训练频率、持续时间、反馈模式以及与其他疗法整合策略等方面缺乏统一标准,使跨研究比较更加困难,并在一定程度上限制了结果的可重复性与外推性。将脑机接口(BCI)训练纳入多模式康复计划,并与物理治疗、职业治疗、机器人训练或功能性电刺激(FES)等手段结合,可能通过

互补机制进一步强化神经可塑性变化, 并支持更持续的功能恢复。此外, 便携式家用 BCI 系统的开发被认为是一条具有前景的方向, 可在正式临床环境之外提供持续的强化训练, 帮助患者维持运动功能, 并降低出院后常见的功能衰退风险。

### 4.3. 安全性和可行性

安全性是脑机接口(BCI)纳入常规康复实践的前提。现有研究一致表明, BCI 训练在卒中患者中总体安全, 不良反应发生率极低[39]。目前临床应用的 BCI 系统以非侵入式为主, 多采用头皮脑电图(EEG)电极进行信号采集, 无需手术植入, 从而显著降低了严重不良事件风险。相关研究显示, 非侵入性 BCI 在卒中患者中耐受性良好, 尚未报告严重不良反应[21]。即便出现不适, 通常仅为轻度疲劳或局部皮肤刺激, 发生率较低。这些结果支持 BCI 在安全性与可接受性方面具备临床推广基础, 亦适用于部分功能较脆弱的患者群体。

在技术与应用层面, BCI 的发展正朝着更友好的图形用户界面(GUI)及适用于临床与家庭场景的便携化系统演进, 同时更加重视患者舒适度与训练负荷管理[41]。临床实践中, BCI 训练通常采用较短单次时长与适中强度, 以避免过度疲劳; 这一点在卒中康复中尤为重要, 因为患者体能与耐力差异显著[42]。训练时间过长或频率过高可能诱发疲劳, 从而削弱训练效果并降低依从性。

## 5. 挑战与未来方向

现有研究提示, 将脑机接口与其他康复手段整合应用, 较单一干预可能获得更优的功能结局, 但最优组合模式仍有待明确[43]。BCI 与物理治疗、职业治疗、机器人辅助训练或功能性电刺激(FES)联合, 可通过中枢—外周协同激活增强康复效果。其中 BCI-FES 有助于同步皮层活动与肌肉收缩, 提升功能恢复潜力。多模态 BCI 可提高外部设备控制稳定性, 为构建任务导向的闭环训练提供技术基础。脑刺激技术在卒中康复中已具备循证支持, 可通过调节皮层兴奋性促进运动学习和神经可塑性[44]。在联合应用中, BCI 不仅用于解码运动意图和提供反馈, 还可与脑刺激协同调控特定脑区活动, 从而进一步增强康复效果。既往研究显示, TMS 或 tDCS 联合 BCI 训练在手部运动和功能结局方面优于传统治疗[45] [46]。未来研究需系统优化多模式干预的关键参数, 并评估其在不同临床环境中的成本效益, 以形成可操作的循证建议。

尽管 BCI 训练的短期获益较为一致, 其长期疗效仍缺乏充分证据。当前纵向研究数量有限, 随访设计不统一, 难以明确疗效维持与衰减规律。已有研究提示, 若缺乏持续干预, 功能改善可能趋于停滞或回落, 强调了长期维持策略的重要性[34]。未来研究应采用标准化基准数据集和一致的结局指标[47], 并遵循最低报告规范, 以提升研究可重复性和跨研究可比性[48]。多中心合作对于统一训练流程和评估体系同样关键, 有助于积累可靠的长期循证证据并加速临床转化。卒中患者在病灶特征、功能障碍程度及神经可塑性潜能方面高度异质, 显著影响 BCI 疗效[49]。因此, BCI 训练需强调个体化设计, 通过调整反馈形式、任务难度和刺激参数, 以提高训练参与度和治疗效果[50] [51]。

机器学习和人工智能为个性化 BCI 提供了重要支撑。通过整合多维临床与神经数据, AI 模型可预测治疗反应并优化训练方案, 同时提高运动意图识别的准确性和闭环控制稳定性[52] [53]。然而, 如何将 AI 驱动的个性化策略稳妥融入常规临床流程, 并验证其在不同患者群体中的泛化能力, 仍需进一步研究。

## 6. 结论

脑机接口(brain-computer interface, BCI)正逐步发展为卒中康复与运动功能恢复领域中一项具有重要转化潜力的辅助技术, 大量临床与实验研究已充分证实其在短期内改善卒中患者运动功能、促进神经可

塑性以及提升生活质量方面的积极作用。现有证据亦表明，如何在真实临床环境中维持和巩固这些短期获益，以实现稳定、可持续的长期功能改善，仍然是 BCI 临床应用面临的核心挑战之一。未来研究仍需通过设计更加严谨的纵向随访研究，在不同时间尺度上系统评估 BCI 干预的疗效持久性，并明确影响长期结局的关键因素。在此基础上，结合机器学习和人工智能方法整合患者的人口学特征、临床表现、神经影像学与电生理数据，有望构建更为精准和个体化的康复干预策略，从而优化治疗决策并提高临床疗效。同时，持续推进 BCI 相关硬件与算法的技术创新、完善临床操作流程和专业培训体系、降低设备和实施成本，以及系统应对伦理与监管层面的挑战，对于推动 BCI 从研究环境走向常规临床实践同样至关重要。总而言之，随着长期循证证据的不断积累、个体化治疗模式的逐步成熟以及多学科协作的深入开展，脑机接口有望在卒中康复体系中发挥更加核心的作用，逐步发展为一种安全、有效且可推广的标准化干预手段，为卒中幸存者带来更持久的功能恢复和更高质量的社会回归。

## 参考文献

- [1] Bonnet, M., Decety, J., Jeannerod, M. and Requin, J. (1997) Mental Simulation of an Action Modulates the Excitability of Spinal Reflex Pathways in Man. *Cognitive Brain Research*, **5**, 221-228. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(96\)00072-9](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(96)00072-9)
- [2] Lotze, M. and Halsband, U. (2006) Motor Imagery. *Journal of Physiology-Paris*, **99**, 386-395. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2006.03.012>
- [3] Ma, Z., Wu, J., Cao, Z., Hua, X., Zheng, M., Xing, X., et al. (2024) Motor Imagery-Based Brain-Computer Interface Rehabilitation Programs Enhance Upper Extremity Performance and Cortical Activation in Stroke Patients. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **21**, 2402-2414. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01387-w>
- [4] Wen, D., Fan, Y., Hsu, S., Xu, J., Zhou, Y., Tao, J., et al. (2021) Combining Brain-Computer Interface and Virtual Reality for Rehabilitation in Neurological Diseases: A Narrative Review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, **64**, Article ID: 101404. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2020.03.015>
- [5] Vidaurre, C. and Blankertz, B. (2009) Towards a Cure for BCI Illiteracy. *Brain Topography*, **23**, 194-198. <https://doi.org/10.1007/s10548-009-0121-6>
- [6] Lotte, F., Larrue, F. and Mühl, C. (2013) Flaws in Current Human Training Protocols for Spontaneous Brain-Computer Interfaces: Lessons Learned from Instructional Design. *Frontiers in Human Neuroscience*, **7**, Article 568. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00568>
- [7] Ang, K.K., Guan, C., Phua, K.S., Wang, C., Zhou, L., Tang, K.Y., et al. (2014) Brain-Computer Interface-Based Robotic End Effector System for Wrist and Hand Rehabilitation: Results of a Three-Armed Randomized Controlled Trial for Chronic Stroke. *Frontiers in Neuroengineering*, **7**, Article 30. <https://doi.org/10.3389/fneng.2014.00030>
- [8] Vourvopoulos, A., Jorge, C., Abreu, R., Figueiredo, P., Fernandes, J. and Bermúdez i Badia, S. (2019) Efficacy and Brain Imaging Correlates of an Immersive Motor Imagery BCI-Driven VR System for Upper Limb Motor Rehabilitation: A Clinical Case Report. *Frontiers in Human Neuroscience*, **13**, Article 244. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00244>
- [9] Crosbie, J.H., McDonough, S.M., Gilmore, D.H. and Wiggam, M.I. (2004) The Adjunctive Role of Mental Practice in the Rehabilitation of the Upper Limb after Hemiplegic Stroke: A Pilot Study. *Clinical Rehabilitation*, **18**, 60-68. <https://doi.org/10.1191/0269215504cr702oa>
- [10] Mane, R., Chouhan, T. and Guan, C. (2020) BCI for Stroke Rehabilitation: Motor and Beyond. *Journal of Neural Engineering*, **17**, Article ID: 041001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aba162>
- [11] Yang, S., Li, R., Li, H., Xu, K., Shi, Y., Wang, Q., et al. (2021) Exploring the Use of Brain-Computer Interfaces in Stroke Neurorehabilitation. *BioMed Research International*, **2021**, Article ID: 9967348. <https://doi.org/10.1155/2021/9967348>
- [12] Fu, J., Chen, S., Shu, X., Lin, Y., Jiang, Z., Wei, D., et al. (2023) Functional-Oriented, Portable Brain-Computer Interface Training for Hand Motor Recovery after Stroke: A Randomized Controlled Study. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article 1146146. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1146146>
- [13] Bai, Z., Fong, K.N.K., Zhang, J.J., Chan, J. and Ting, K.H. (2020) Immediate and Long-Term Effects of BCI-Based Rehabilitation of the Upper Extremity after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 57. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00686-2>
- [14] Marino, M. and Mantini, D. (2024) Human Brain Imaging with High-Density Electroencephalography: Techniques and Applications. *The Journal of Physiology*, **604**, 783-812. <https://doi.org/10.1113/jp286639>

- [15] Jeunet, C., Glize, B., McGonigal, A., Batail, J. and Micoulaud-Franchi, J. (2019) Using EEG-Based Brain Computer Interface and Neurofeedback Targeting Sensorimotor Rhythms to Improve Motor Skills: Theoretical Background, Applications and Prospects. *Neurophysiologie Clinique*, **49**, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2018.10.068>
- [16] Cervera, M.A., Soekadar, S.R., Ushiba, J., Millán, J.D.R., Liu, M., Birbaumer, N., *et al.* (2018) Brain-Computer Interfaces for Post-Stroke Motor Rehabilitation: A Meta-Analysis. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, **5**, 651-663. <https://doi.org/10.1002/acn3.544>
- [17] Lennon, O., Tonellato, M., Del Felice, A., Di Marco, R., Fingleton, C., Korik, A., *et al.* (2020) A Systematic Review Establishing the Current State-Of-The-Art, the Limitations, and the DESIRED Checklist in Studies of Direct Neural Interfacing with Robotic Gait Devices in Stroke Rehabilitation. *Frontiers in Neuroscience*, **14**, Article 578. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00578>
- [18] Semprini, M., Lencioni, T., Hinterlang, W., Vassallo, C., Scarpetta, S., Maludrottu, S., *et al.* (2022) User-Centered Design and Development of Twin-Acta: A Novel Control Suite of the TWIN Lower Limb Exoskeleton for the Rehabilitation of Persons Post-Stroke. *Frontiers in Neuroscience*, **16**, Article 915707. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.915707>
- [19] Cheng, N., Phua, K.S., Lai, H.S., Tam, P.K., Tang, K.Y., Cheng, K.K., *et al.* (2020) Brain-Computer Interface-Based Soft Robotic Glove Rehabilitation for Stroke. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **67**, 3339-3351. <https://doi.org/10.1109/tbme.2020.2984003>
- [20] Louie, D.R. and Eng, J.J. (2016) Powered Robotic Exoskeletons in Post-Stroke Rehabilitation of Gait: A Scoping Review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **13**, Article No. 53. <https://doi.org/10.1186/s12984-016-0162-5>
- [21] Colucci, A., Vermehren, M., Cavallo, A., Angerhöfer, C., Peekhaus, N., Zollo, L., *et al.* (2022) Brain-Computer Interface-Controlled Exoskeletons in Clinical Neurorehabilitation: Ready or Not? *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **36**, 747-756. <https://doi.org/10.1177/15459683221138751>
- [22] Frolov, A.A., Mokienco, O., Lyukmanov, R., Biryukova, E., Kotov, S., Turbina, L., *et al.* (2017) Post-Stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial. *Frontiers in Neuroscience*, **11**, Article 400. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00400>
- [23] Gaxiola-Tirado, J.A., Ianez, E., Ortiz, M., Gutierrez, D. and Azorin, J.M. (2019) Effects of an Exoskeleton-Assisted Gait Motor Imagery Training in Functional Brain Connectivity. 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, 23-27 July 2019, 429-432. <https://doi.org/10.1109/embc.2019.8857232>
- [24] Moucheboeuf, G., Griffier, R., Gasq, D., Glize, B., Bouyer, L., Dehail, P., *et al.* (2020) Effects of Robotic Gait Training after Stroke: A Meta-Analysis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, **63**, 518-534. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2020.02.008>
- [25] Neves, M.V.M., Furlan, L., Fregni, F., Battistella, L.R. and Simis, M. (2023) Robotic-Assisted Gait Training (RAGT) in Stroke Rehabilitation: A Pilot Study. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, **5**, Article ID: 100255. <https://doi.org/10.1016/j.arrct.2023.100255>
- [26] Oh, K., Park, J., Jo, S.H., Hong, S., Kim, W., Paik, N., *et al.* (2021) Improved Cortical Activity and Reduced Gait Asymmetry during Poststroke Self-Paced Walking Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **18**, Article No. 60. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00859-7>
- [27] Kitai, K., Odagiri, M., Yamauchi, R. and Kodama, T. (2021) Evaluation of Intervention Effectiveness of Sensory Compensatory Training with Tactile Discrimination Feedback on Sensorimotor Dysfunction of the Hand after Stroke. *Brain Sciences*, **11**, Article 1314. <https://doi.org/10.3390/brainsci11101314>
- [28] Serrada, I., Hordacre, B. and Hillier, S.L. (2019) Does Sensory Retraining Improve Sensation and Sensorimotor Function Following Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Neuroscience*, **13**, Article 402. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00402>
- [29] Belkacem, A.N., Jamil, N., Palmer, J.A., Ouhbi, S. and Chen, C. (2020) Brain Computer Interfaces for Improving the Quality of Life of Older Adults and Elderly Patients. *Frontiers in Neuroscience*, **14**, Article 692. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00692>
- [30] Hughes, C., Herrera, A., Gaunt, R., *et al.* (2020) Bidirectional Brain-Computer Interfaces. *Handbook of Clinical Neurology*, **168**, 163-181.
- [31] Awuah, W.A., Ahluwalia, A., Darko, K., Sanker, V., Tan, J.K., Tenkorang, P.O., *et al.* (2024) Bridging Minds and Machines: The Recent Advances of Brain-Computer Interfaces in Neurological and Neurosurgical Applications. *World Neurosurgery*, **189**, 138-153. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2024.05.104>
- [32] Shu, X., Chen, S., Meng, J., Yao, L., Sheng, X., Jia, J., *et al.* (2019) Tactile Stimulation Improves Sensorimotor Rhythm-Based BCI Performance in Stroke Patients. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **66**, 1987-1995. <https://doi.org/10.1109/tbme.2018.2882075>

- [33] Ziadeh, H., Gulyas, D., Nielsen, L.D., Lehmann, S., Nielsen, T.B., Kjeldsen, T.K.K., *et al.* (2021) “Mine Works Better”: Examining the Influence of Embodiment in Virtual Reality on the Sense of Agency during a Binary Motor Imagery Task with a Brain-Computer Interface. *Frontiers in Psychology*, **12**, Article 806424. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.806424>
- [34] Ramos-Murguialday, A., Curado, M.R., Broetz, D., Yilmaz, Ö., Brasil, F.L., Liberati, G., *et al.* (2019) Brain-Machine Interface in Chronic Stroke: Randomized Trial Long-Term Follow-Up. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **33**, 188-198. <https://doi.org/10.1177/1545968319827573>
- [35] Biasucci, A., Leeb, R., Iturrate, I., Perdakis, S., Al-Khodairy, A., Corbet, T., *et al.* (2018) Brain-Actuated Functional Electrical Stimulation Elicits Lasting Arm Motor Recovery after Stroke. *Nature Communications*, **9**, Article No. 2421. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04673-z>
- [36] Ang, K.K., Chua, K.S.G., Phua, K.S., Wang, C., Chin, Z.Y., Kuah, C.W.K., *et al.* (2014) A Randomized Controlled Trial of EEG-Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke. *Clinical EEG and Neuroscience*, **46**, 310-320. <https://doi.org/10.1177/1550059414522229>
- [37] Zhang, M., Zhu, F., Jia, F., Wu, Y., Wang, B., Gao, L., *et al.* (2024) Efficacy of Brain-Computer Interfaces on Upper Extremity Motor Function Rehabilitation after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *NeuroRehabilitation*, **54**, 199-212. <https://doi.org/10.3233/nre-230215>
- [38] Liu, J., Li, Y., Zhao, D., Zhong, L., Wang, Y., Hao, M., *et al.* (2025) Efficacy and Safety of Brain-Computer Interface for Stroke Rehabilitation: An Overview of Systematic Review. *Frontiers in Human Neuroscience*, **19**, Article 1525293. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1525293>
- [39] Carvalho, R., Dias, N. and Cerqueira, J.J. (2019) Brain-Machine Interface of Upper Limb Recovery in Stroke Patients Rehabilitation: A Systematic Review. *Physiotherapy Research International*, **24**, e1764. <https://doi.org/10.1002/pri.1764>
- [40] Pichiorri, F., Morone, G., Petti, M., Toppi, J., Pisotta, I., Molinari, M., *et al.* (2015) Brain-Computer Interface Boosts Motor Imagery Practice during Stroke Recovery. *Annals of Neurology*, **77**, 851-865. <https://doi.org/10.1002/ana.24390>
- [41] Peksa, J. and Mamchur, D. (2023) State-Of-The-Art on Brain-Computer Interface Technology. *Sensors*, **23**, Article 6001. <https://doi.org/10.3390/s23136001>
- [42] Kruse, A., Suica, Z., Taeymans, J. and Schuster-Amft, C. (2020) Effect of Brain-Computer Interface Training Based on Non-Invasive Electroencephalography Using Motor Imagery on Functional Recovery after Stroke—A Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Neurology*, **20**, Article No. 385. <https://doi.org/10.1186/s12883-020-01960-5>
- [43] Baniqued, P.D.E., Stanyer, E.C., Awais, M., Alazmani, A., Jackson, A.E., Mon-Williams, M.A., *et al.* (2021) Brain-Computer Interface Robotics for Hand Rehabilitation after Stroke: A Systematic Review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **18**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00820-8>
- [44] Bolognini, N., Pascual-Leone, A. and Fregni, F. (2009) Using Non-Invasive Brain Stimulation to Augment Motor Training-Induced Plasticity. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **6**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-8>
- [45] Chew, E., Teo, W., Tang, N., Ang, K.K., Ng, Y.S., Zhou, J.H., *et al.* (2020) Using Transcranial Direct Current Stimulation to Augment the Effect of Motor Imagery-Assisted Brain-Computer Interface Training in Chronic Stroke Patients—Cortical Reorganization Considerations. *Frontiers in Neurology*, **11**, Article 948. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.00948>
- [46] Shu, X., Chen, S., Chai, G., Sheng, X., Jia, J. and Zhu, X. (2018) Neural Modulation by Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) for BCI Enhancement in Stroke Patients. 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Honolulu, 18-21 July 2018, 2272-2275. <https://doi.org/10.1109/embc.2018.8512860>
- [47] Wang, Y., Chen, X., Gao, X. and Gao, S. (2017) A Benchmark Dataset for Ssvp-Based Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **25**, 1746-1752. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2016.2627556>
- [48] Roy, Y., Banville, H., Albuquerque, I., Gramfort, A., Falk, T.H. and Faubert, J. (2019) Deep Learning-Based Electroencephalography Analysis: A Systematic Review. *Journal of Neural Engineering*, **16**, Article ID: 051001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab260c>
- [49] Corbetta, M., Ramsey, L., Callejas, A., Baldassarre, A., Hacker, C.D., Siegel, J.S., *et al.* (2015) Common Behavioral Clusters and Subcortical Anatomy in Stroke. *Neuron*, **85**, 927-941. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.02.027>
- [50] Fernandes, J.B., Fernandes, S., Domingos, J., Castro, C., Romão, A., Graúdo, S., *et al.* (2024) Motivational Strategies Used by Health Care Professionals in Stroke Survivors in Rehabilitation: A Scoping Review of Experimental Studies. *Frontiers in Medicine*, **11**, Article 1384414. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1384414>
- [51] Verrienti, G., Raccagni, C., Lombardozzi, G., De Bartolo, D. and Iosa, M. (2023) Motivation as a Measurable Outcome in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review of the Literature. *International Journal of Environmental Research and*

- Public Health*, **20**, Article 4187. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054187>
- [52] Hossain, K.M., Islam, M.A., Hossain, S., Nijholt, A. and Ahad, M.A.R. (2023) Status of Deep Learning for EEG-Based Brain-Computer Interface Applications. *Frontiers in Computational Neuroscience*, **16**, Article 1006763. <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.1006763>
- [53] Uyanik, C., Khan, M.A., Brunner, I.C., Hansen, J.P. and Puthusserypady, S. (2022) Machine Learning for Motor Imagery Wrist Dorsiflexion Prediction in Brain-Computer Interface Assisted Stroke Rehabilitation. *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, Glasgow, 11-15 July 2022, 715-719. <https://doi.org/10.1109/embc48229.2022.9871600>