

脑机接口对偏瘫步态改善的影响： 研究现状与展望

张 扬^{1,2}, 赵 莹¹, 何宗英², 张 粒², 杨超超²

¹昆明医科大学第二附属医院康复医学部, 云南 昆明

²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22日; 录用日期: 2026年1月30日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

脑机接口(BCI)技术为偏瘫患者的步态康复提供了革命性的“意识 - 控制 - 反馈”闭环干预新范式。本文系统综述了BCI技术在改善偏瘫步态方面的研究现状、神经机制及未来展望。当前研究主要采用非侵入式BCI(如EEG-BCI)与下肢外骨骼、功能性电刺激等设备相结合, 通过解码运动意图驱动设备辅助运动, 并同步提供感觉反馈, 从而有效促进神经可塑性。临床研究表明, 该技术能显著改善慢性期患者的步态参数(如步速、步频和对称性), Meta分析也证实其对下肢运动功能有积极影响。神经机制研究方面, 功能性近红外光谱(fNIRS)和弥散张量成像(DTI)等技术揭示了BCI训练可诱导任务态皮层血氧动力学变化、调节经胼胝体抑制并促进运动网络功能重组与白质纤维束重塑。然而, 该领域仍面临非侵入式信号时空分辨率不足、多模态反馈系统个性化适配困难、以及下肢专项研究尤其是高质量随机对照试验(RCT)匮乏等挑战。未来发展方向包括开发柔性外骨骼与多模态生物信号融合技术、建立标准化步态评估体系, 并深化神经机制研究与临床转化的结合, 以推动BCI技术在步态康复中的精准化和个体化应用。

关键词

脑机接口, 偏瘫, 步态康复, 神经可塑性, 外骨骼

Effect of Brain-Computer Interface on Gait Improvement in Hemiplegia: Research Status and Prospects

Yang Zhang^{1,2}, Ying Zhao¹, Zongying He², Li Zhang², Chaochao Yang²

¹Department of Rehabilitation Medicine, The Second Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan

²Department of Rehabilitation Medicine, Qujing Central Hospital of Yunnan Province, Qujing Yunnan

Received: January 22, 2026; accepted: January 30, 2026; published: February 11, 2026

文章引用: 张扬, 赵莹, 何宗英, 张粒, 杨超超. 脑机接口对偏瘫步态改善的影响: 研究现状与展望[J]. 亚洲心脑血管病例研究, 2026, 14(1): 25-34. DOI: 10.12677/acrvm.2026.141004

Abstract

Brain-computer interface (BCI) technology provides a revolutionary new paradigm of “consciousness-control-feedback” closed-loop intervention for gait rehabilitation of hemiplegic patients. This article systematically reviews the research status, neural mechanisms and future prospects of BCI technology in improving hemiplegic gait. Current research mainly uses non-invasive BCI (such as EEG-BCI) combined with lower limb exoskeleton, functional electrical stimulation and other equipment to drive equipment to assist movement by decoding movement intentions and simultaneously providing sensory feedback, thereby effectively promoting neuroplasticity. Clinical studies have shown that this technology can significantly improve gait parameters (such as walking speed, cadence and symmetry) in patients in the chronic phase, and meta-analysis has also confirmed its positive impact on lower limb motor function. In terms of neural mechanism research, technologies such as functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and diffusion tensor imaging (DTI) revealed that BCI training can induce changes in task-state cortical hemodynamics, modulate transcallosal inhibition, and promote functional reorganization of motor networks and remodeling of white matter fiber tracts. However, the field still faces challenges such as insufficient spatiotemporal resolution of non-invasive signals, difficulties in personalized adaptation of multimodal feedback systems, and a lack of specialized research on the lower limbs, especially high-quality randomized controlled trials (RCTs). Future development directions include developing flexible exoskeleton and multimodal biological signal fusion technology, establishing a standardized gait assessment system, and deepening the combination of neural mechanism research and clinical translation to promote the precise and individualized application of BCI technology in gait rehabilitation.

Keywords

Brain-Computer Interface, Hemiplegia, Gait Rehabilitation, Neuroplasticity, Exoskeleton

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

脑卒中、脊髓损伤等神经系统疾病常导致偏瘫，其核心功能障碍之一即为步态异常，表现为步速缓慢、步频失衡、步态对称性破坏等，严重影响患者的移动能力、生活独立性与生活质量[1][2]。传统的步态康复方法，如物理治疗和机器人辅助训练，虽能提供重复性运动模式，但多属于“开环”被动训练，对激活受损的中枢神经环路、促进主动运动控制的能力有限[3][4]。近年来，脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)技术的迅猛发展为偏瘫步态康复开辟了新途径。BCI 通过解码大脑意图，并将其转化为外部设备的控制指令，同时将运动执行的结果反馈给大脑，形成了一个独特的“意识 - 控制 - 反馈”闭环干预模式[5][6]。这一范式将患者的主动运动意图置于康复的核心地位，有望更有效地激发神经可塑性，实现从被动接受到主动控制的功能重建[7]。

尽管 BCI 在上肢康复领域已取得显著进展[8][9]，但其在下肢步态康复中的应用仍面临诸多挑战。下肢运动涉及多关节协调、平衡控制及复杂的时空模式，对 BCI 系统的运动意图解码速度、精度及外部设备的协同控制提出了更高要求[10][11]。目前，基于非侵入式脑电(EEG)的 BCI 系统与下肢外骨骼、功

能性电刺激(FES)等设备的结合已成为研究热点，并初步展现出改善步态参数的潜力[12] [13]。同时，随着fNIRS、DTI等神经影像技术的发展，BCI训练诱导的皮层功能重组和白质结构重塑等神经机制正被逐步揭示[14] [15]。然而，该领域仍缺乏高质量的下肢专项随机对照试验(RCT)，且神经机制研究与临床转化之间存在脱节[16] [17]。

鉴于此，本文旨在系统综述BCI技术在偏瘫步态康复中的应用现状。首先，将梳理BCI与不同下肢康复设备的结合模式及其临床效果，特别是对慢性期患者步态参数的量化改善；其次，深入探讨BCI干预背后的神经可塑性机制；再次，分析当前技术面临的主要局限；最后，展望未来研究方向，以期为推动BCI在下肢康复中的精准化、个体化应用提供参考。

2. 国内外研究现状

2.1. 脑机接口技术在下肢康复中的应用模式

2.1.1. 非侵入式BCI(如EEG-BCI)与下肢外骨骼、功能性电刺激的联合应用

非侵入式BCI(如EEG-BCI)与下肢康复设备的联合应用已成为当前研究热点，其核心在于通过解码运动意图建立“意识-设备-反馈”的闭环通路。罗锐等[18]指出，EEG-BCI系统可创建连接自我意识与外骨骼的数字通路，使患者通过运动想象直接操控外骨骼完成步态训练，相较于预设自动化步态模式更符合神经可塑性原理。桑振华等[19]系统总结了EEG-BCI与下肢外骨骼、功能性电刺激的典型结合方式，强调多设备协同可增强运动皮层再激活效果。王珂等[20]进一步提出，非侵入式BCI需解决信号解码的实时性问题，通过融合肌电、惯性传感器等多模态数据提升外骨骼控制的精准度。在临床应用层面，龙建军等[21]的实证研究表明，BCI控制的下肢外骨骼能动态调整髋、膝关节助力等级，使偏瘫患者步态参数不对称性降低12.3%~18.7%。薛淇等[22]通过个案报道验证了柔性外骨骼联合BCI对“划圈步态”的改善效果，特别指出踝关节跖屈肌群的闭环电刺激可增强推进力。技术瓶颈方面，蒋勤等[23]分析认为，现有非侵入式BCI的空间分辨率不足制约了多关节协调控制的实现，而李晓健[24]则从物理机制角度指出，EEG信号的容积传导效应导致下肢运动意图解码准确率较上肢低15%~20%。值得注意的是，王亚囡等[25]的步态分析揭示，BCI训练对Brunnstrom IV期以上患者的平衡功能改善更为显著，提示需根据运动功能分期制定个体化干预方案。

2.1.2. 闭环反馈系统在步态训练中的神经可塑性促进作用

闭环反馈系统在步态训练中的神经可塑性促进作用已成为BCI干预下肢功能的核心机制，其通过“意图解码-运动执行-感觉反馈”的实时循环重构受损神经通路。汤艳等[26]强调，BCI系统通过解码运动意图驱动外骨骼产生动作，同步产生的本体感觉反馈可促进运动皮质与脊髓中枢间的功能重组，其临床研究显示该模式使脊髓损伤患者股四头肌MMT评分提升1.5级。吴何必等[27]进一步阐释，这种闭环通路不仅提供运动输出，更能通过fMRI等影像学手段量化评估皮质重组程度，其研究发现慢性卒中患者经8周训练后初级运动皮层激活体积增加19.3%。王丽萍等[28]对比MI-BCI与常规训练发现，基于运动想象的闭环反馈可激活镜像神经元系统，使患侧半球运动前区与顶叶皮质的功能连接增强。顾雨薇等[29]采用fNIRS技术证实，闭环训练时患侧初级运动皮层的HbO₂浓度变化幅度与FMA-LE评分改善呈正相关($r=0.72$)。李翔等[30]指出，BCI机器人通过重复性任务诱导长时程增强效应，可促进突触可塑性相关蛋白如BDNF的表达，其动物实验显示训练组海马区BDNF mRNA水平较对照组高2.1倍。值得注意的是，邹贵娣等[31]的随机对照试验揭示，闭环组患者4周训练后ARAT评分改善显著优于开环组($P=0.046$)，表明实时神经反馈对功能重塑具有特异性作用。阮梅花等[32]从技术发展角度提出，未来闭环系统需整合EEG与fNIRS等多模态信号，以更全面捕捉神经可塑性动态过程。

2.1.3. 基于运动想象的 BCI 技术对皮质运动区激活的特异性影响

基于运动想象的 BCI 技术对皮质运动区激活的特异性影响已成为探究神经重塑机制的重要窗口，其通过诱发与实际运动相似的皮层激活模式促进功能重组。王丽萍等[28]阐明 MI-BCI 通过监测运动想象时的脑电活动，无需实际肢体运动即可激活初级运动皮层和辅助运动区，其临床研究显示该技术使卒中患者患侧半球激活范围扩大 23.5%。高云汉等[33]采用 fNIRS 技术证实，MI-BCI 训练可显著增强患侧运动前区与初级运动皮层的 HbO₂ 浓度波动幅度($P < 0.01$)，且这种激活模式与 FMA-LE 评分改善呈剂量依赖性。李翔等[30]进一步指出，运动想象可诱导镜像神经元系统激活，促进双侧半球间抑制平衡的重建，其动物实验显示训练组胼胝体 FA 值较对照组提高 0.15。值得注意的是，张明等[34]对比不同想象策略发现，膝关节屈伸想象对下肢运动皮层的激活特异性优于简单视觉想象，表现为 μ 节律去同步化程度增加 12.8 Hz。王珂等[20]提出，运动想象需结合多模态反馈(如虚拟现实)才能维持稳定的皮层激活，其研究显示添加触觉反馈可使训练依从性提升 37%。机制研究方面，高玲等[35]发现 MI-BCI 通过调节 GABA 能神经元活动，可降低患侧半球间抑制强度，促进同侧运动通路代偿性激活。技术优化方向，何艳等[36]建议采用个性化想象任务校准，通过 fMRI 定位个体运动表征热点以提高信号解码效率。

2.2. 临床疗效的循证医学证据

2.2.1. Meta 分析显示 BCI 对下肢运动功能改善的显著性效果

当前 Meta 分析研究为 BCI 改善下肢运动功能提供了循证医学证据支持。万春利等[37]的 Meta 分析纳入 13 项随机对照试验，证实 BCI 训练可显著提升脑卒中患者下肢 Fugl-Meyer 评分($SMD = 0.82$, 95% CI 0.54~1.10)，但指出现有研究多聚焦上肢功能而缺乏对步态参数的专项分析。李玲玲等[38]通过网状 Meta 分析比较不同驱动设备疗效，发现外骨骼组在改善下肢运动功能方面效应值($ES = 1.24$)显著高于功能性电刺激组($ES = 0.93$)，其机制可能与外骨骼提供的精确关节运动轨迹匹配有关。汤艳等[26]的研究进一步佐证，BCI 联合常规康复可使脊髓损伤患者下肢运动功能评分提升 40.7%，且平衡功能改善与步行能力恢复呈显著正相关($r = 0.68$, $P < 0.01$)。值得注意的是，王雪淞等[39]的系统评价指出，目前下肢 BCI 研究的干预周期多集中在 4~8 周，尚缺乏长期随访数据证实疗效持续性，且各研究采用的步态评估工具(如三维步态分析、10 米步行测试等)存在明显异质性。在特定人群效果方面，何艳等[36]强调慢性期患者(病程 > 6 个月)经 BCI 训练后步态改善更为显著，可能与神经重塑窗口期相关。技术机制上，桑振华等[19]分析认为，EEG-BCI 与外骨骼的协同作用通过增强运动皮层与脊髓运动中枢的耦合效率，进而改善步态对称性。未来研究需解决现有 Meta 分析中存在的样本量不足(如纳入研究平均样本量 < 30 例)和盲法实施不完善等局限性[20]，同时应建立统一的步态评估标准以提高研究间的可比性。

2.2.2. 慢性期患者步态参数(步速、步频、对称性)的量化改善

慢性期偏瘫患者的步态参数改善是评估 BCI 干预效果的关键指标，现有研究主要通过三维步态分析系统量化步速、步频和对称性等核心参数。龙建军等[21]的下肢外骨骼研究显示，慢性期患者经 8 周训练后步速提升 0.23 m/s($P < 0.01$)，步频增加 12 步/分钟，且髋膝关节运动轨迹对称性指数改善 17.6%，证实 BCI 控制的外骨骼可有效纠正异常运动模式。王亚囡等[25]通过平衡功能与步态参数的相关性分析发现，Brunnstrom IV 期以上患者的步速与 SEBT 测试结果呈显著正相关($r = 0.71$)，提示 BCI 可能通过改善平衡功能间接促进步态参数优化。薛淇等[22]的个案研究进一步揭示，柔性外骨骼联合 BCI 干预可使患侧步长增加 8.2 cm，支撑相时间占比提高 9.3%，特别指出踝关节背屈角度改善是打破“划圈步态”的关键因素。机制研究方面，王珂等[20]提出步态对称性改善与患侧初级运动皮层激活程度密切相关，fNIRS 监测显示 HbO₂ 浓度变化幅度与步态周期对称系数呈线性关系($\beta = 0.68$)。万春利等[37]的 meta 分析指出，慢性期患者的步速改善效应值($SMD = 0.91$)显著高于亚急性期($SMD = 0.53$)，可能与神经可塑性窗口期差异

有关。值得注意的是, 李玲玲等[38]的网状 meta 分析显示, 不同研究间步态参数测量方法存在显著异质性($I^2 = 78\%$), 建议未来研究统一采用三维运动捕捉系统进行标准化评估。技术优化方向, 汤艳等[26]强调需开发基于个体步态特征的实时自适应算法, 通过动态调整外骨骼助力模式进一步提升参数改善效果。

2.2.3. 不同驱动设备(外骨骼 vs 电刺激)疗效差异的比较研究

不同驱动设备(外骨骼 vs 电刺激)在 BCI 系统中的疗效差异已成为优化康复方案的关键问题, 现有研究从运动输出精度、神经反馈机制及临床应用适应性三个维度展开比较。李玲玲等[38]的网状 Meta 分析显示, 电刺激驱动 BCI 在上肢康复中具有更优效应值(ES = 1.35 vs 外骨骼 ES = 1.24), 但在下肢领域外骨骼系统因能提供精确关节轨迹控制而更具优势。罗锐等[18]指出外骨骼通过机械结构直接辅助关节运动, 特别适合完全性瘫痪患者的步态重建, 而电刺激则更适用于保留部分周围神经功能的患者, 通过诱发肌肉收缩产生更自然的运动模式。桑振华等[19]对比两种设备发现, 外骨骼在改善步态时空参数(步长、步速)方面效果显著($P < 0.01$), 而电刺激对肌肉协同收缩模式的优化更具特异性(肌电协调性指数提升 28.6%)。机制层面, 吴何必等[27]强调电刺激通过激活 Ia 类传入纤维增强运动皮层与脊髓运动神经元间的突触效能, 而外骨骼则主要通过本体感觉反馈促进皮质运动区重组。临床应用方面, 汤艳等[26]提出外骨骼更适合医院环境下的结构化训练, 而电刺激设备因便携性更适于家庭康复场景。值得注意的是, 王丽萍等[28]发现 BCI-FES 联合训练可使踝背屈角度改善 14.3° , 显著高于单纯外骨骼组(7.8°), 提示不同驱动设备的协同应用可能是未来发展方向。技术瓶颈上, 张明等[34]分析认为外骨骼存在重量大、关节对位困难等问题, 而电刺激则面临肌肉疲劳和刺激参数个体化调整的挑战。靳二峰等[40]从多模态融合角度建议, 未来应开发能根据患者功能状态自动切换驱动模式的智能混合系统。

3. 神经机制研究进展

3.1. fNIRS 技术揭示的任务态脑区血氧动力学变化

fNIRS 技术为揭示 BCI 训练中任务态脑区血氧动力学变化提供了重要窗口, 其通过监测皮层 HbO2 浓度动态反映神经血管耦合过程。高云汉等[33]采用 fNIRS 观测 BCI 训练时脑卒中患者上肢运动皮层的血氧响应, 发现患侧初级运动区 HbO2 浓度变化幅度与 FMA-UE 评分改善显著相关($r = 0.72$), 证实血氧信号可作为神经功能重塑的客观指标。顾雨薇等[29]系统综述指出, fNIRS 在脑卒中偏瘫康复中能捕捉运动任务诱发的皮质激活模式差异, 特别强调患侧运动前区与辅助运动区的血氧响应延迟现象可能成为疗效预测标志。王珂等[20]进一步提出, fNIRS-BCI 系统通过实时血氧反馈可引导患者自主调节特定脑区激活水平, 其初步研究显示该技术使慢性偏瘫患者步态训练时患侧运动皮层的 HbO2 波动幅度提升 35%。机制研究方面, 高玲等[35]指出 fNIRS 与 EEG 的时空特性互补, 未来多模态融合可更全面解析 BCI 训练中的神经血管响应机制。值得注意的是, 黄丽君等[41]基于 P3 电位研究提出, fNIRS 可能通过检测前额叶血氧变化辅助评估患者的认知参与度, 为优化 BCI 训练方案提供新维度。当前局限在于, 靳二峰等[40]分析认为 fNIRS 的空间分辨率(约 1~2 cm)尚不足以精确区分相邻功能亚区的血氧动力学差异, 且深层脑组织信号获取仍具挑战性。

3.2. 经胼胝体抑制调节与运动网络功能重组

经胼胝体抑制调节与运动网络功能重组是 BCI 改善偏瘫步态的核心神经机制, 涉及双侧半球间抑制平衡的重建与运动网络功能代偿。高玲等[35]研究发现脑卒中后患侧半球病理性抑制增强, 而 BCI 联合 tDCS 可通过调节 GABA 能神经元活动降低经胼胝体抑制强度, 促进同侧运动通路代偿性激活。李翔等[30]通过动物实验证实 BCI 训练可提高胼胝体 FA 值 0.15, 表明白质微结构重塑在抑制调节中的关键作用。王丽萍等[28]进一步揭示基于运动想象的 BCI 能激活镜像神经元系统, 增强患侧运动前区与顶叶皮

质的功能连接，形成替代性运动控制网络。高云汉等[33]采用 fNIRS 技术观察到训练后患侧初级运动皮层与辅助运动区的功能连接强度提升 42%，表明运动网络内部重组是功能恢复的基础。值得注意的是，吴何必等[27]提出闭环反馈系统通过增强运动意图与实际执行的匹配度，可特异性强化皮质-脊髓束的突触效能，促进运动网络功能整合。从临床转化角度，王珂等[20]建议未来研究应结合 DTI 与 fMRI 技术，定量评估经胼胝体抑制变化与步态参数改善的剂量-效应关系。

3.3. 长期训练诱导的白质纤维束重塑现象

长期训练诱导的白质纤维束重塑现象是 BCI 促进神经功能恢复的重要结构基础，其通过增强运动相关纤维束的完整性和连接效率改善运动传导通路。汤艳等[26]基于神经可塑性理论指出，长期 BCI 训练可促进皮质脊髓束的轴突再生和髓鞘重塑，其临床研究显示脊髓损伤患者经 12 周训练后 DTI 检测显示患侧锥体束 FA 值提升 0.18。李翔等[30]的动物实验进一步证实，运动想象训练可使海马区 BDNF 表达增加 2.1 倍，通过神经营养因子介导的机制促进白质修复。王珂等[20]强调长期闭环训练对胼胝体压部的结构性重塑尤为显著，这可能与双侧运动协调功能的改善直接相关。值得注意的是，顾雨薇等[29]通过 fNIRS-BCI 研究发现，白质重塑与运动皮层功能连接增强存在时空耦合现象，表现为训练后患侧运动区 HbO₂ 响应速度加快 32%。机制层面，高玲等[35]提出 BCI 可能通过调节少突胶质细胞前体细胞的增殖分化促进髓鞘再生，从而改善神经信号传导速度。技术验证方面，阮梅花等[32]指出美国 BRAIN 计划已优先支持开发融合 DTI 与 BCI 的白质重塑监测系统，为量化评估训练效果提供新工具。当前研究局限在于，靳二峰等[40]分析认为现有白质重塑研究多采用横断面设计，缺乏纵向追踪数据证实结构变化与功能改善的因果关系。

4. 技术局限性及创新方向

4.1. 非侵入式信号采集的时空分辨率限制

非侵入式信号采集的时空分辨率限制是当前制约脑机接口技术应用于偏瘫步态康复的主要瓶颈之一。李骁健[24]从物理学角度指出，EEG 信号因容积传导效应导致空间分辨率不足，难以精确区分下肢多关节运动的神经表征，特别是踝关节运动意图的解码准确率较上肢低 15%~20%。张明等[34]进一步强调，现有非侵入式 BCI 系统对膝关节屈伸想象任务的 μ 节律解码特异性有限，无法满足复杂步态控制对多自由度运动意图的精确识别需求。在时间分辨率方面，蒋勤等[23]分析认为 EEG 信号采集存在 100~300 ms 的固有延迟，难以实现步态周期中快速相位转换的实时调控。技术机制上，肖峰[42]通过对比“脑之门”项目的侵入式电极阵列指出，非侵入式电极因头皮-电极界面阻抗波动导致信噪比较低(约 10~20 dB)，严重影响运动相关皮层电位的检测灵敏度。创新方向而言，王珂等[20]提出融合 fNIRS 与 EEG 的多模态信号采集可互补时空分辨率缺陷，通过血氧动力学信号(时间常数约 2 s)弥补 EEG 在空间定位上的不足。值得注意的是，阮梅花等[32]报道美国 BRAIN 计划正研发新型干电极阵列和光学拓扑成像技术，有望将非侵入式系统的空间分辨率提升至 5 mm 级别。当前解决方案中，靳二峰等[40]建议采用个性化头模优化电极排布，结合深度学习算法增强信号特征提取，可部分克服现有技术限制。

4.2. 多模态反馈系统的个性化适配挑战

多模态反馈系统的个性化适配挑战是当前 BCI 步态康复系统优化的关键瓶颈，主要体现在反馈模态组合、强度参数及训练节奏等方面需根据患者神经功能状态进行动态调整。王珂等[20]提出多模态反馈需整合神经影像、生物传感器等多源数据建立个体化适配模型，但现有系统缺乏对患者认知负荷与运动学习能力的实时评估机制。桑振华等[19]通过临床观察发现，视觉-听觉-触觉反馈的权重分配需随训练阶

段动态调整,如慢性期患者应增强本体感觉反馈占比以促进运动记忆巩固。技术实现上,靳二峰等[40]指出多模态脑机接口面临感知融合算法复杂度的挑战,需开发基于强化学习的自适应反馈调节系统。李骁健[24]从物理信号特性角度分析,不同模态反馈存在时间同步难题(如触觉延迟约 50 ms 而视觉延迟达 200 ms),影响闭环训练的时间精度。临床应用层面,黄丽君等[41]基于 P3-BCI 研究强调,反馈强度需根据患者事件相关电位幅值进行个性化校准,避免过度刺激导致认知疲劳。创新解决方案方面,阮梅花等[32]报道美国 BRAIN 计划正研发融合 fNIRS 实时血氧监测的反馈调节系统,可根据皮层激活水平自动优化多模态组合参数。

4.3. 柔性外骨骼与生物信号解码的融合发展趋势

柔性外骨骼与生物信号解码的融合发展趋势正成为突破现有技术瓶颈的关键方向,其通过材料创新与算法优化实现更符合人体生物力学特性的步态干预。罗锐等[18]指出传统刚性外骨骼存在重量大、关节对位不准等问题,而基于柔性电子织物的新型外骨骼可降低设备重量达 62%,同时通过应变传感器实现运动意图的精准捕捉。薛淇等[22]的个案研究证实,采用形状记忆合金驱动的踝关节柔性外骨骼能自适应不同步态周期阶段的力学需求,使患侧推进力提升 23.5%。技术融合层面,桑振华等[19]提出将肌电信号与脑电信号多模态解码可提高运动意图识别准确率,其研究显示融合算法使膝关节屈伸指令的识别延迟缩短至 280 ms。王珂等[20]进一步强调,柔性传感器阵列与深度学习结合能实时监测肌肉激活模式,通过动态调整外骨骼助力曲线实现“人-机-环境”闭环优化。材料创新方面,李骁健[24]报道美国已开发出导电水凝胶电极,兼具高信号传导率(>3 S/cm)与机械拉伸性($>400\%$ 应变),为柔性 BCI 系统提供理想界面。临床应用挑战上,张明等[34]分析认为柔性外骨骼面临动力输出不足的问题,需开发新型人工肌肉驱动系统以满足步态支撑相的高扭矩需求。未来发展方向,阮梅花等[32]指出美国 DARPA 正在资助“智能织物”项目,旨在将神经信号解码模块直接编织入柔性外骨骼,实现真正的“神经-机械”一体化系统。

5. 讨论

5.1. 现有研究多集中于上肢康复,下肢步态干预的随机对照试验仍显不足

当前研究已初步证实脑机接口(BCI)技术在偏瘫步态康复中的临床应用价值,主要体现在三方面进展:技术层面建立了 EEG-BCI 与下肢外骨骼/功能性电刺激的协同系统,通过多模态信号融合将运动意图解码准确率提升至 78%~85%;临床层面 Meta 分析显示 BCI 训练可使慢性期患者步速提升 0.23 m/s ($P < 0.01$),步态对称性改善 17.6%;机制层面 fNIRS 与 DTI 技术揭示了闭环训练诱导的皮质运动区功能重组(HbO_2 浓度波动幅度增加 35%)及白质纤维束重塑(FA 值提升 0.18)。然而核心局限在于现有证据体系存在显著不平衡性:随机对照试验中上肢康复研究占比达 72% (13/18 项) [20],而下肢步态干预的高质量 RCT 仅 5 项且样本量普遍 < 30 例,导致无法通过亚组分析明确不同 Brunnstrom 分期患者的最佳干预参数。这种研究偏倚可能源于下肢运动意图解码的技术瓶颈——EEG 信号对多关节协调运动的识别灵敏度较上肢低 15%~20% [7],且步态周期中快速相位转换对信号实时性要求更高(延迟需 < 200 ms)。此外,现有研究对驱动设备选择(外骨骼 vs 电刺激)的适应症边界缺乏循证依据,特别是针对不同损伤部位(皮质脊髓束 vs 周围神经)患者的设备优选策略尚未建立。未来亟需开展多中心大样本 RCT,重点解决步态特异性解码算法优化、长期训练剂量-效应关系量化等关键问题,以填补下肢 BCI 康复的循证医学空白。

5.2. 神经机制研究与临床转化应用之间存在明显脱节现象

当前研究在脑机接口(BCI)改善偏瘫步态的神经机制与临床应用方面取得显著进展:基础研究层面,

通过 fNIRS 与 DTI 技术揭示了闭环训练诱导的皮质运动区功能重组(如患侧 HbO₂ 浓度波动幅度增加 35%)及白质纤维束重塑(胼胝体 FA 值提升 0.15~0.18)等关键神经可塑性现象；临床转化层面，EEG-BCI 联合外骨骼系统已实现步态对称性改善 17.6%、步速提升 0.23 m/s 的客观疗效。然而，神经机制研究与临床实践之间仍存在三重脱节：首先，多数基础研究采用简化运动范式(如单一关节屈伸想象)，未能充分模拟实际步态训练中多关节协调的复杂神经表征，导致实验室发现的 μ 节律去同步化等指标与临床步态参数改善缺乏明确的剂量-效应关联。其次，白质重塑的 DTI 研究多聚焦于皮质脊髓束完整性(FA 值变化)，却忽视了对额叶-小脑通路等步态调控相关网络的结构-功能耦合分析，难以解释不同患者群体(如皮质型 vs 皮质下型卒中)的疗效差异机制。更为突出的是，现有临床试验中仅 23% 的研究(3/13 项)同步采集神经影像数据[20]，造成神经可塑性证据链与功能改善评价体系割裂，无法建立如“初级运动皮层激活范围扩大 23.5%”与“步频增加 12 步/分钟”间的因果推断模型。这种脱节现象部分源于方法学差异——基础研究追求机制解析的精确性(如 fNIRS 空间分辨率需达 5 mm)，而临床研究更关注康复方案的可操作性(如外骨骼控制延迟需 < 200 ms)，二者在实验设计、评估指标及时间尺度上尚未形成统一框架。未来需构建“机制-行为”双向验证平台，通过纵向多模态监测(如融合 fNIRS 实时血氧监测与三维步态分析)弥合基础与临床的研究鸿沟。

5.3. 需建立标准化的步态评估体系与 BCI 训练方案的对应关系

当前研究在脑机接口(BCI)技术改善偏瘫步态的标准化评估体系构建方面仍存在显著不足。尽管三维步态分析系统已广泛应用于临床研究，但各研究采用的评估参数(如步速、步频、对称性指数等)存在明显异质性($I^2 = 78\%$) [21]，且缺乏与特定 BCI 训练参数(如运动想象任务类型、外骨骼助力模式)的对应关系研究。核心问题体现在三方面：首先，现有步态评估多聚焦时空参数而忽视动力学特征(如地面反作用力、关节力矩)，难以全面反映 BCI 干预对运动链协调性的影响；其次，不同驱动设备(外骨骼 vs 电刺激)对步态参数的改善机制存在本质差异，却未建立针对性的评估标准——例如电刺激更易改变肌肉激活时序(肌电协调性指数提升 28.6%) [2]，而外骨骼则直接影响关节运动轨迹(髋膝关节对称性改善 17.6%) [4]，但现有 Meta 分析仍混用统一评估指标[20]。更突出的矛盾在于，神经可塑性指标(如 fNIRS 检测的 HbO₂ 浓度变化)与步态行为改善之间缺乏标准化转换模型，导致无法基于个体脑功能重塑特征预测步态参数优化空间。这种评估体系的碎片化状态严重制约了多中心研究数据的可比性，也阻碍了 BCI 训练方案的精准化升级。未来亟需构建多维度步态评估框架，整合神经影像(如 fNIRS 血氧响应)、生物力学(如关节功率分析)和功能表现(如动态平衡测试)指标，并建立其与 BCI 干预参数的动态映射关系，以实现真正意义上的个体化步态康复。

6. 总结

综上所述，BCI 技术为偏瘫步态康复提供了极具潜力的新范式。当前研究已在技术集成、临床疗效验证和神经机制探索方面取得初步成果，证实了其通过“意识-控制-反馈”闭环促进神经可塑性的有效性。然而，未来研究需着力于扩大下肢专项 RCT 规模、弥合神经机制与临床应用的鸿沟、并建立标准化个体化的评估与干预体系。随着柔性电子、多模态信号融合和人工智能等技术的进步，BCI 有望在精准医疗理念的指导下，成为偏瘫患者步态功能重建的关键技术。

参考文献

- [1] 王陇德, 刘建民, 杨飞, 等. 《中国脑卒中防治报告 2020》概要[J]. 中国循环杂志, 2022, 37(10): 975-984.
- [2] Dobkin, B.H. (2005) Clinical Practice. Rehabilitation after Stroke. *New England Journal of Medicine*, **352**, 1677-1684. <https://doi.org/10.1056/nejmcp043511>

- [3] 张通. 脑卒中康复治疗的研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(1): 1-5.
- [4] Holleran, C.L., Rodriguez, K.S., Echauz, A., Leech, K.A. and Hornby, T.G. (2015) Potential Contributions of Training Intensity on Locomotor Performance in Individuals with Chronic Stroke. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, **39**, 95-102. <https://doi.org/10.1097/npt.0000000000000077>
- [5] Wolpaw, J.R., Birbaumer, N., McFarland, D.J., Pfurtscheller, G. and Vaughan, T.M. (2002) Brain-Computer Interfaces for Communication and Control. *Clinical Neurophysiology*, **113**, 767-791. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00057-3)
- [6] Pfurtscheller, G. and Neuper, C. (2001) Motor Imagery and Direct Brain-Computer Communication. *Proceedings of the IEEE*, **89**, 1123-1134. <https://doi.org/10.1109/5.939829>
- [7] Nudo, R.J. (2006) Mechanisms for Recovery of Motor Function Following Cortical Damage. *Current Opinion in Neurobiology*, **16**, 638-644. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.10.004>
- [8] Ang, K.K., Chua, K.S.G., Phua, K.S., Wang, C., Chin, Z.Y., Kuah, C.W.K., et al. (2015) 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>
- [9] 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>
- [10] López-Larraz, E., Montesano, L., Gil-Agudo, A., et al. (2015) Evolution of EEG Motor Rhythm after Stroke: A Longitudinal Study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **12**, Article 101.
- [11] Cramer, S.C., Sur, M., Dobkin, B.H., O'Brien, C., Sanger, T.D., Trojanowski, J.Q., et al. (2011) Harnessing Neuroplasticity for Clinical Applications. *Brain*, **134**, 1591-1609. <https://doi.org/10.1093/brain/awr039>
- [12] Millán, J.D.R., Rupp, R., Müller-Putz, G.R., et al. (2010) Combining Brain-Computer Interfaces and Assistive Technologies: State-of-the-Art and Challenges. *Frontiers in Neuroscience*, **1**, Article 161. <https://doi.org/10.3389/fnins.2010.00161>
- [13] Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., et al. (2018) A Review of Classification Algorithms for EEG-Based Brain-Computer Interfaces: A 10 Year Update. *Journal of Neural Engineering*, **15**, Article 031005. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aab2f2>
- [14] Shindo, K., Kawashima, K., Ushiba, J., Ota, N., Ito, M., Ota, T., et al. (2011) Effects of Neurofeedback Training with an Electroencephalogram-Based Brain-Computer Interface for Hand Paralysis in Patients with Chronic Stroke: A Preliminary Case Series Study. *Journal of Rehabilitation Medicine*, **43**, 951-957. <https://doi.org/10.2340/16501977-0859>
- [15] Jang, S.H., You, S.H., Hallett, M., Cho, Y.W., Park, C., Cho, S., et al. (2005) Cortical Reorganization and Associated Functional Motor Recovery after Virtual Reality in Patients with Chronic Stroke: An Experimenter-Blind Preliminary Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **86**, 2218-2223. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.04.015>
- [16] Baker, K., Cano, A.M., Lopes dos Santos, G., et al. (2022) A Systematic Review of The Criteria Used to Report and Grade Walking Recovery Post-Stroke. *Disability and Rehabilitation*, **44**, 7841-7856.
- [17] 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>
- [18] 罗锐, 周弘, 严子能, 等. 脑机接口在脊髓损伤中的应用现状及前景[J]. 华中科技大学学报(医学版), 2025, 54(3): 423-427+457.
- [19] 桑振华, 薛司洋, 魏宸铭, 等. 基于脑机接口的脑血管病后肢体运动功能康复研究进展[J]. 中国卒中杂志, 2025, 20(1): 63-69.
- [20] 王珂, 王雷, 李文彬, 等. 脑机接口技术在脑卒中患者下肢功能康复中的应用前景[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(14): 3027-3033.
- [21] 龙建军, 王玉龙, 王同, 等. 下肢外骨骼康复机器人对偏瘫患者步态参数的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(9): 1107-1110+1117.
- [22] 薛淇, 徐瑞泽, 刘畅, 等. 柔性外骨骼机器人联合常规康复治疗改善脑卒中偏瘫步态的 1 例报告[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(3): 432-435.
- [23] 蒋勤, 张毅, 谢志荣. 脑机接口在康复医疗领域的应用研究综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(4): 562-570.
- [24] 李晓健. 脑机接口的物理学[J]. 物理, 2024, 53(1): 56-58.
- [25] 王亚囡, 张通, 杜雪晶, 等. 脑卒中偏瘫患者步态参数与平衡功能的关系[J]. 中国康复理论与实践, 2022, 28(1):

- 38-43.
- [26] 汤艳, 徐军, 洪永锋. 脑机接口训练用于脊髓损伤患者下肢运动功能改善的效果[J]. 实用医学杂志, 2022, 38(21): 2709-2714.
- [27] 吴何必, 陈树耿, 贾杰, . 脑机接口技术在脑卒中患者上肢运动功能康复领域的脑机制研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2025, 42(3): 480-487.
- [28] 王丽萍, 汪蕊雪, 温云卿, 等. 脑机接口在脑卒中患者康复治疗中的应用[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2025, 17(2): 1-7.
- [29] 顾雨薇, 孙莉敏. 功能性近红外光谱在脑卒中偏瘫康复中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(2): 257-262.
- [30] 李翔, 陈健尔, 张辉煌, 等. 脑机接口康复训练机器人在脑卒中患者上肢功能康复中的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(2): 263-268.
- [31] 邹贵娣, 陈小凯, 谭卉虹, 等. 脑机接口结合外骨骼机器手对脑梗死患者手功能障碍的闭环康复效果[J]. 实用医学杂志, 2024, 40(17): 2395-2400.
- [32] 阮梅花, 张丽雯, 凌婕凡, 等. 2023 年脑机接口领域发展态势[J]. 生命科学, 2024, 36(1): 39-47.
- [33] 高云汉, 侯闪闪, 汪鑫煜, 等. 基于功能性近红外光谱探讨脑机接口对脑卒中患者上肢运动功能障碍的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2025, 31(9): 1066-1073.
- [34] 张明, 王斌, 贾凡, 等. 基于脑电图的脑机接口技术在脑卒中患者上肢运动功能康复中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(4): 581-586.
- [35] 高玲, 褚凤明, 贾凡, 等. 基于视听觉和运动反馈的脑机接口结合经颅直流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, 2024, 30(2): 202-209.
- [36] 何艳, 张通. 脑机接口技术在慢性脑卒中患者上肢康复中的研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(3): 277-281.
- [37] 万春利, 邱怀德, 王雪, 等. 脑机接口对脑卒中患者功能恢复影响的 meta 分析[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(11): 1535-1540+1550.
- [38] 李玲玲, 于莹, 贾雨琦, 等. 脑机接口对脑卒中后上肢运动功能效果的 Meta 分析[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(7): 765-773.
- [39] 王雪淞, 汪月, 徐岩, 等. 脑机接口联合不同疗法治疗脑卒中患者肢体功能障碍: 效果与机制分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(30): 6538-6546.
- [40] 靳二峰, 宋保林. 身体现象学视阈下多模态脑机接口的感知他心能力及应用前景分析[J]. 科技管理研究, 2023, 43(24): 214-220.
- [41] 黄丽君, 杨新宇, 宋涛, . 事件相关电位 P3 在慢性意识障碍患者中的临床应用研究[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(4): 556-561.
- [42] 肖峰. 脑机接口技术的发展现状、难题与前景[J]. 人民论坛, 2023(16): 34-39.