·探索脑机接口与神经调控技术的应用·

非侵入式脑机接口在脑卒中手功能康复中的临床应用进展：预测、评估、干预

哈丽米热·斯提瓦力地[1,2] 陈树耿[1*] 贾杰[1,3,4]

（1. 复旦大学附属华山医院康复医学科，上海 200040；2. 上海中医药大学康复医学院，上海 201203；
3. 国家老年疾病临床医学研究中心，上海 200040；4. 国家神经疾病医学中心，上海 200040）

【摘要】 脑卒中可引发患者的肢体运动功能异常，其后遗症中手功能障碍发生率高且恢复难度大，严重影响患者的日常生活质量。近年来，脑机接口技术逐渐被应用于脑卒中康复，其中非侵入式脑机接口（non-invasive brain-computer interface, NBCI）因安全便捷、无需手术植入等优势，已广泛应用于脑卒中手功能康复研究领域。本文围绕NBCI在脑卒中手功能康复中的临床应用，系统综述其在预后预测、功能评估和康复干预方面的研究进展，梳理以上3个方向的核心内容与发展现状，总结当前研究的优势与不足，以期为深化NBCI在脑卒中手功能康复领域的临床应用、多中心验证及居家康复推广提供参考。

【关键词】 非侵入式脑机接口；脑卒中；手功能；预测；评估；干预

【中图分类号】 TH77；R49 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202604005

Clinical applications of non-invasive brain-computer interfaces in hand function rehabilitation after stroke: prediction, assessment, and intervention

Halimire Sitiwalidi[1,2], Chen Shugeng[1], Jia Jie[1,3,4]*

*(1.Department of Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China;
2.School of Rehabilitation Science, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China;
3.National Clinical Research Center for Aging and Medicine, Shanghai 200040, China;
4.National Center for Neurological Disorders, Shanghai 200040, China)*

【Abstract】 Stroke can cause motor dysfunction of the limbs, and hand dysfunction is highly prevalent and difficult to recover from, severely affecting patients' quality of daily life. In recent years, brain-computer interface technologies have been gradually applied in stroke rehabilitation, among which non-invasive brain-computer interface (NBCI), owing to its advantages of safety, convenience, and no need for surgical implantation, has been widely used in research on hand function rehabilitation after stroke. This paper focuses on the clinical application of NBCI in hand function rehabilitation after stroke and systematically reviews the research progress in prognosis prediction, functional assessment, and rehabilitation intervention. It summarizes the core content and current developmental status of these three directions, highlights the strengths and limitations of existing studies, and aims to provide references for deepening the clinical application of NBCI in hand function rehabilitation after stroke, multi-center verification, and promotion of home-based rehabilitation.

【Key words】 Non-invasive brain-computer interface; Stroke; Hand function; Prediction; Assessment; Intervention

基金项目：上海市养老科技专项（24YL1900202）；国家自然科学基金资助项目（82202798）；上海扬帆专项（22YF1404200）

第一作者：哈丽米热·斯提瓦力地，女，本科，研究方向：脑机接口与神经康复

通信作者：陈树耿，男，博士研究生，主管治疗师，研究方向：脑机接口与神经康复

脑卒中已经成为全球第二位致死原因和第三位致残原因[1]。数据显示，我国40岁及以上人群中，脑卒中患病人数高达1 318万且呈增长趋势[2]。80%以上的患者遗留有不同程度的肢体功能障碍[3]，其中，手功能的恢复是最具挑战性的环节之一[4]，严重影响患者的日常生活[5]。

非侵入式脑机接口（non-invasive brain-computer interface, NBCI）因无需手术、安全便捷、可重复使用等优势，近年来在神经康复领域得到了广泛关注[6-7]。在脑卒中康复中，NBCI主要通过运动想象（motor imagery, MI）等任务诱导大脑皮层电生理活动并转化为实时反馈，通过反复训练促进功能重建[8-9]。

本文主要基于近15年国内外相关研究，系统综述NBCI在脑卒中手功能康复中的研究进展，重点关注预后预测指标、动态功能评估方法以及多模态干预策略，以期构建贯穿“预后预测—过程评估—精准干预”全流程的系统性研究框架，为临床实践和未来研究提供参考。

1 资料与方法

本综述以“脑机接口”“脑卒中”“手”“上肢”“预测”“评估”“干预”为中文检索词，以“brain-computer interface”“stroke”“hand”“upper limb”“prediction”“assessment”“intervention”为英文检索词，在中国知网和PubMed数据库对研究论文、综述文章和述评等相关文献进行检索。近15年是脑机接口技术在脑卒中康复领域应用的关键时期，因此检索时间范围设定为2011年1月至2026年5月，共检索得到613篇文献，其中，中文文献43篇，英文文献570篇。经严格筛选并手动加入4篇文献，最终得到同时符合纳入与排除标准的文献共42篇。纳入标准：①与脑卒中、脑机接口、手及上肢功能3项中任意两项组合相关的文献；②研究内容具有创新性或临床转化价值；③方法学质量较高的文献；④研究结果真实且逻辑严谨的文献。排除标准：①无法获取全文的文献；②重复发表的文献。文献检索和筛选流程见图1。

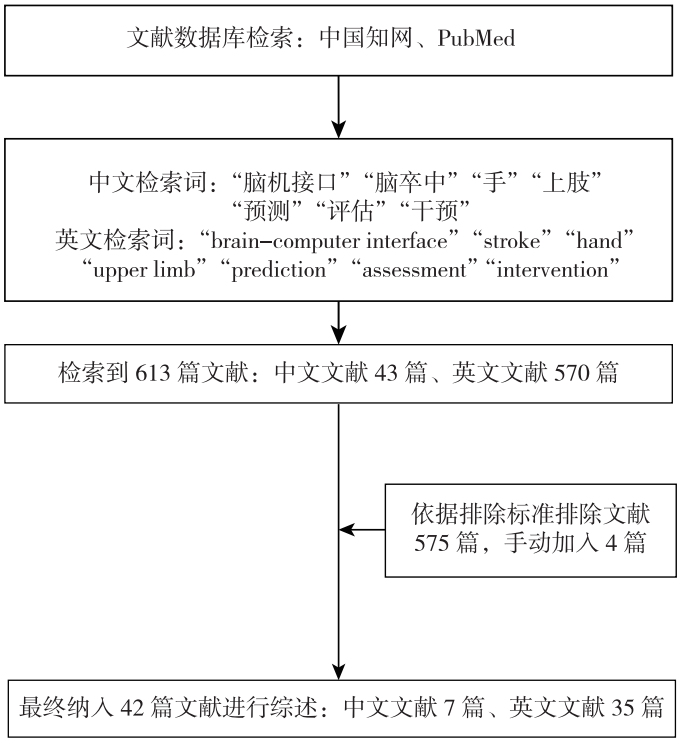


图1 文献检索和筛选流程

2 NBCI在脑卒中手功能康复中的应用

2.1 与NBCI手功能康复相关的预后研究

NBCI在脑卒中手功能康复中的应用效果存在显著个体差异，并非所有患者都能通过训练改善手功能。因此，识别出能够预测NBCI手功能康复效果的神经生理与影像标志物，对于筛选出适合NBCI干预的患者具有重要意义。预后研究的核心在于利用治疗前或治疗早期的指标构建预测模型，以评估个体化的NBCI对手功能的康复效果。与NBCI手功能康复相关的预后研究见表1。

表1 与NBCI手功能康复相关的预后研究

研究者	发表年份	信号采集方式	预测指标	干预方式	研究结果
Buch等[10]	2012年	MEG+DTI+MRI	对侧上纵束FA值；同侧功能网络成本效率	MI–NBCI+手部矫形器	双侧顶额通路结构与功能完整性是NBCI控制技能预后的关键神经基础
Rathee等[11]	2019年	MEG	β低频段静息态FC	外骨骼+MA–NBCI	β低频段静息态FC与运动功能恢复正相关，额顶叶连接呈偏侧化重组模式
Carino–Escobar等[12]	2019年	EEG	β频带ERD/ERS；α频带活动	NBCI	β频带ERD/ERS与手功能恢复进程关联密切，α频带可能与运动学习相关
Mane等[13]	2019年	EEG	BSI；PRI	MI–NBCI+机器人 *vs.* MI–NBCI+tDCS	BSI预测单纯NBCI效果，PRI预测NBCI+tDCS效果，体现干预特异性预测
Lin等[14]	2021年	EEG	首次NBCI训练的EEG时–频–空特征	MI–NBCI	CNN模型可基于首次训练EEG有效预测后续康复效果
Carino–Escobar等[15]	2021年	EEG+TMS	EEG特征、TMS诱发电位、握力等多模态变量	MI–NBCI	多模态模型可预测FMA–UE和ARAT，但对高恢复水平患者存在低估
Ma等[16]	2024年	fMRI	对侧中央前回zALFF；同侧楔叶zReHo	MI–NBCI	静息态fMRI局部指标与NBCI治疗后运动功能改善正相关
Lu等[17]	2025年	fMRI	高阶跨模态网络BOLD信号；格兰杰因果连接强度	多感觉反馈NBCI	跨模态网络激活增强及信息流重组可有效预测康复效果，交叉验证证实
Chen等[18]	2025年	EEG	θ频带功率、DAR/DTABR	NBCI–FES	θ功率与FMA改善呈强正相关

注：MEG为脑磁图；DTI为弥散张量成像；MRI为磁共振成像；FA为各向异性分数（DTI指标）；MI–NBCI为运动想象–脑机接口；FC为功能连接；MA–NBCI为运动执行–脑机接口；EEG为脑电图；ERD为事件相关去同步化；ERS为事件相关同步化；BSI为脑对称指数；PRI为位置相关指数；tDCS为经颅直流电刺激；CNN为卷积神经网络；TMS为经颅磁刺激；FMA–UE为Fugl–Meyer上肢功能评估量表；ARAT为上肢动作研究测试；fMRI为功能性磁共振成像；zALFF为标准化低频振幅分数；zReHo为标准化局部一致性；BOLD为血氧水平依赖；DAR为δ与α功率之比；DTABR为δ+θ与α+β功率之比；NBCI–FES为非侵入式脑机接口联合功能电刺激；FMA为Fugl–Meyer评估量表。

2.1.1 基于脑电图的预后研究

静息态脑电图（electroencephalogram, EEG）因采集相对简便成为探索预测指标的首选参照。Carino–Escobar等[12]对9例亚急性期患者NBCI训练中的EEG进行分析，结果显示，β频带事件相关去同步化（event–related desynchronization, ERD）/事件相关同步化（event–related synchronization, ERS）变化与手功能恢复进程关联密切，提示静息态β频带活动及其网络属性可作为康复预后的候选指标。Chen等[18]对100例患者进行4.5年的随访发现，θ频带功率与Fugl–Meyer评估量表（Fugl–Meyer assessment scale, FMA）改善呈强正相关，NBCI联合功能性电刺激（functional electrical stimulation, FES）干预组的δ/α功率比（delta/alpha power ratio, DAR）和（δ+θ）/（α+β）功率比［(delta + theta)/(alpha + beta) power ratio, DTABR］显著下降，基线θ功率较高的患者对NBCI–FES干预响应更好，提示静息态θ功率与DAR/DTABR可作为稳定预后标志物。

任务态EEG可通过MI或运动尝试（motor attempt, MA）时的脑激活模式进行预测。Mane等[13]通过比较患者接受单纯NBCI或经颅直流电刺激（transcranial direct current stimulation, tDCS）联合NBCI干预的效果，发现脑对称指数（brain symmetry index, BSI）可特异性预测单纯NBCI干预的临床增益，而功率比指数（power ratio index, PRI）则可预测NBCI+tDCS联合干预的效果，说明不同干预存在特异性神经预测因子，该发现为个体化干预选择

提供了依据。Lin等[14]在此基础上引入深度学习方法，利用11例患者首次NBCI训练中的动态EEG功能连接和功率谱构建卷积神经网络（convolutional neural network, CNN）模型，预测2周康复训练后的FMA恢复率，结果显示，模型预测值与实际恢复率呈良好线性拟合，展示了深度学习在基于早期单次训练数据进行个体化预后评估方面的潜力，但该研究样本量较小，有待大样本验证。

2.1.2 基于脑成像的预后研究

功能性磁共振成像（functional magnetic resonance imaging, fMRI）的空间分辨率优势有助于揭示脑网络重组与手功能康复的关系。Ma等[16]的试验显示，NBCI治疗后Fugl–Meyer上肢功能评估量表（Fugl–Meyer assessment of upper extremity, FMA–UE）改善与对侧中央前回的z分数标准化低频振幅（z–score amplitude of low–frequency fluctuations, zALFF）及同侧楔叶的z分数标准化局部一致性（z–score regional homogeneity, zReHo）呈正相关，提示fMRI指标可作为NBCI手功能康复的预后标志物。Lu等[17]的研究发现，治疗后高阶跨模态网络的激活增强与运动改善相关，且格兰杰因果分析显示信号从受损运动皮层经跨模态网络传递至完整半球，该信息流模式的变化可预测康复效果。

脑磁图（magnetoencephalogram, MEG）因其优异的时间分辨率，可动态捕捉脑网络功能连接（functional connection, FC）的演变。Rathee等[11]发现β频段静息态FC网络中，双侧运动皮层间正相关子网络与上肢动作研究测试（action research arm test, ARAT）改善呈正相关，额顶叶连接则表现出偏侧化重组模式，提示β频段静息态FC可作为运动功能恢复的预测指标。Buch等[10]进一步利用MEG结合弥散张量成像（diffusion tensor imaging, DTI），揭示了对侧上纵束白质完整性和同侧半球全局功能网络成本效率均与NBCI控制技能正相关，表明双侧顶额通路完整性是预后的关键神经基础。

此外，功能性近红外光谱（functional near–infrared spectroscopy, fNIRS）因便携性、低成本、抗运动干扰等优势，更适合床旁及社区康复场景中的脑成像信号采集[19]。相较而言，fMRI和MEG在预测方面的证据更为充分，但因设备昂贵、操作复杂，限制了其在常规临床中的应用；fNIRS虽便携性更优，但目前尚缺乏大样本、长随访的预测效度研究。

2.1.3 基于多模态融合的预后研究

多模态融合通过整合临床、电生理和影像资料，有望提高预测准确性。Carino–Escobar等[15]采用回归树集成模型，将EEG时频特征（ERD/ERS、相干性）与经颅磁刺激（transcranial magnetic stimulation, TMS）诱发电位及握力等变量整合，预测10例脑卒中患者康复训练2个月后的FMA–UE和ARAT评分，结果显示，FMA–UE和ARAT评分预测效果较好，中位预测误差分别为0.3分和3.4分，但模型在高功能患者中存在系统性低估问题。该研究为多模态融合在NBCI预后预测中的应用提供了初步方法学参考，未来需在标准化框架下纳入基线临床指标，进一步验证多模态融合的增量预测价值。

2.2 NBCI对脑卒中手功能康复的评估研究

准确评估手功能是制定康复方案和监测疗效的基础。与FMA–UE、ARAT等传统量表相比，NBCI在干预过程中可实时采集脑信号，为动态、客观地评估手功能开辟了新途径。康复评估的重点在于监测患者在训练过程中的功能变化，而脑信号指标可反映神经可塑性的动态演变。近期发布的《脑机接口康复评估临床应用专家共识》[20]系统总结了BCI在肢体运动功能康复评估中的技术规范与评估指标，明确指出基于MI或MA范式的μ/β节律ERD/ERS、运动相关皮层电位等指标可作为评估皮层募集状态和神经可塑性的重要补充，为临床决策提供参考。相关研究汇总见表2。

表2 NBCI对脑卒中手功能康复的评估研究

研究者	年份	研究类型	评估时机	实时监测指标	量化评估指标	评估维度	临床量表	干预方式	研究结果
Pichiorri等[9]	2015年	RCT	训练中实时评估	SMR–ERD	高密度EEG、TMS–MEP	运动意图与皮层兴奋性	FMA	NBCI+虚拟手	BCI组FMA评分改善优于对照组，患侧ERD增强
陈树耿等[21]	2016年	RCT	训练中实时评估	ERD(μ节律)	ERD地形图	皮层激活水平	MAS、FMA	NBCI+外骨骼	NBCI组脑区激活更明显，效果持续1周以上
杨延辉等[22]	2023年	RCT	训练中实时评估	脑参与度（β/α能量比）	—	主动参与程度	FMA-UE、MBI	NBCI+软体手套	试验组脑参与度动态上升，量表评分优于对照组
He等[23]	2025年	RCT	训练中实时评估	DAR/DABR	EMG、fNIRS	注意与多模态功能	FMA–UE	NBCI+骑行机器人	BCI组FMA–UE改善优于对照组，DAR/DABR显著下降
Pichiorri等[24]	2023年	横断面研究	训练前离线评估	—	CMC网络属性	中枢–外周耦合效率	FMA-UE、MMT	单次手部伸展与抓握任务	CMC网络异常与上肢功能评分显著相关
Barios等[25]	2025年	横断面+纵向研究	训练前、中、后离线评估	—	PMBR、ERD、PMBR/ERD	皮层抑制功能	MRC	外骨骼辅助康复训练	重度患者患侧PMBR缺失，比值与MRC正相关
Lv等[26]	2025年	横断面研究（含分类算法）	任务态离线评估	—	微状态特征	MI能力	—	左右手MI任务	左右手MI微状态A/C差异显著，分类准确率高
Tan等[27]	2026年	RCT	训练前、后离线评估	—	CMC偏侧化指数（LI）、ΔCMC、共收缩指数（CI）	皮层–肌肉耦合重组、运动学习机制	FMA–UE、ARAT、MAS	CMC–EMG驱动的NMES–机器人训练	引导组患侧CMC偏侧化指数显著升高（$P<0.05$），对照组无显著变化

注：RCT为随机对照试验；SMR为感觉运动节律；ERD为事件相关去同步化；EEG为脑电图；TMS为经颅磁刺激；MEP为运动诱发电位；FMA为Fugl–Meyer评估量表；NBCI为非侵入式脑机接口；MAS为改良Ashworth痉挛评定量表；FMA–UE为Fugl–Meyer上肢功能评估量表；MBI为改良巴氏指数；DAR为δ与α功率之比；DABR为δ与(α+β)功率之比；EMG为肌电图；fNIRS为功能性近红外光谱；CMC为皮层–肌肉相干性；MMT为徒手肌力测试；PMBR为运动后β反弹；MRC为医学研究委员会肌力分级量表；MI为运动想象；ARAT为上肢动作研究测试；NMES为神经肌肉电刺激；ERS为事件相关同步化。

2.2.1 NBCI训练过程中的实时动态评估

实时动态评估主要集中在以下几类指标。脑参与度（β/α能量比）超阈值时触发软体康复手套辅助抓握，其动态上升可反映主动参与程度的提升[22]。感觉运动节律（sensorimotor rhythm, SMR）的实时检测可驱动外骨骼或虚拟手提供即时反馈，同时客观反映皮层激活水平[9,21]。He等[23]将DAR、δ/（α+β）功率比［delta/(alpha+beta) power ratio, DABR］、肌 电（electromyography, EMG）与fNIRS组合，同步实时监测并用于调节辅助力度，干预后各指标同步改善。上述研究初步表明，实时脑信号评估在技术层面已基本可行。

2.2.2 NBCI训练前/后的客观量化评估

离线量化评估侧重于从不同维度刻画神经可塑性状态。微状态特征分析[26]显示，脑卒中患者左右手MI时微状态A与C的持续时间、发生率和覆盖率存在显著差异，K最近邻算法（K–nearest neighbors, KNN）分类准确率达75%，可客观量化MI能力并反映脑网络重组的偏侧化模式。皮层–肌肉相干性（corticomuscular coherence, CMC）分析可从网络属性角度量化中枢–外周耦合效率：脑卒中患者患侧CMC网络权重显著低于健康对照，且网络密度增加、肌肉特异性下降，CMC网络属性与FMA–UE评分及徒手肌力测试成绩显著相关[24]。Tan等[27]进一步将CMC同时应用于离线评估和实时反馈控制，训练后引导组患侧半球偏侧化指数显著升高且3个月随访维持，验证了CMC作为生物反馈信号实现“评估–反馈–训练”闭环的可行性。运动后β反弹（post–movement beta rebound, PMBR）等皮层抑制相关指标已被初步应用于追踪

康复进程[25]。

2.3 NBCI对脑卒中手功能康复的干预研究

干预应用是NBCI在康复医学中的核心落脚点，其核心是通过反复的“意图–反馈”配对，诱导神经可塑性，促进运动功能重建。根据反馈方式的不同，干预应用可大致分为单纯NBCI反馈和NBCI联合其他技术的多模态干预。NBCI干预脑卒中手功能康复的原始研究见表3。

表3 NBCI干预脑卒中手功能康复的原始研究

研究者	年份	范式/技术	研究设计	样本	干预方式	研究结果
Pichiorri等[9]	2015年	MI–NBCI	RCT	亚急性期卒中患者（n=28）	MI–NBCI *vs.* 单纯MI，12次/4周	NBCI组FMA–UE改善显著优于对照组
Bundy等[28]	2017年	NBCI+外骨骼	单臂试验	慢性期卒中患者（n=10）	居家NBCI–外骨骼，10 min/次，≥5次/周×12周	ARAT平均提高6.2分
Mane等[13]	2019年	NBCI+tDCS	RCT	慢性期卒中患者（n=19）	NBCI+tDCS *vs.* NBCI，60 min/次（含准备），10次/2周	两组临床改善相似，但电生理标志物变化不同，可为个性化康复方案选择提供依据
Cheng等[29]	2020年	NBCI+软体手套	RCT	慢性期卒中患者（n=11）	NBCI–软体手套 *vs.* 单纯软体手套，90 min/次，3次/周×6周	组间无显著差异，但NBCI组FMA/ARAT改善24周随访持续
Guo等[30]	2022年	SSVEP–NBCI	RCT	慢性期卒中患者（n=30）	SSVEP–NBCI+软体手套 *vs.* 单纯手套 *vs.* 常规，10次/2周	NBCI组FMA–UL改善显著
胡义茜等[31]	2022年	NBCI+多模态感知反馈	单臂试验	慢性期严重偏瘫患者（n=12）	MI–NBCI+毛刷+VR，30 min/次，5次/周×4周	FMA–UE和ARAT显著改善
杨延辉等[22]	2023年	NBCI+VR	RCT	脑卒中患者（n=50）	NBCI+VR *vs.* 传统被动训练，20 min/次，1次/5天×2周	试验组FMA–UE、MBI、MoCA评分均显著改善，脑参与度上升21%
Wang等[32]	2024年	NBCI+FES+VR	多中心RCT	缺血性卒中患者（n=296）	NBCI+常规 *vs.* 常规，30 min/次，5次/周×4周	NBCI组FMA–UE改善显著优于对照组
Brunner等[4]	2024年	NBCI+FES	RCT	亚急性期严重瘫痪患者（n=40）	NBCI–FES *vs.* 常规康复，60 min/次，3～4次/周×3～4周	ARAT改善组间无显著差异，CST完整性是唯一显著预测因素
Ma等[16]	2024年	MI–NBCI	RCT	慢性期卒中患者（n=40）	NBCI+常规 *vs.* 常规，40 min/次，5次/周×2周	NBCI组FMA–UE改善更优
Chen等[18]	2025年	NBCI–FES	RCT+4.5年纵向随访	老年（60～90岁）卒中患者（n=100）	NBCI–FES *vs.* FES *vs.* 常规，8周	NBCI–FES组FMA和MBI改善显著优于对照组，出血性卒中患者改善更佳
Kim等[33]	2025年	MI–NBCI	双盲RCT	慢性期卒中患者（n=25）	MI–偶联FES *vs.* 非偶联FES，20次/4周	偶联组腕伸肌肌力改善显著优于对照组
Takasaki等[34]	2026年	NBCI+外骨骼+FES	单臂试验	慢性期严重偏瘫患者（n=8）	NBCI–外骨骼+FES，30 min/次，1次/天×7天	FMA显著提高，伴对侧半球功能重组
Colucci等[35]	2026年	便携式混合脑/神经外骨骼	可行性研究	卒中患者（n=5）	无线EEG+EOG控制外骨骼，顺序控制范式	EEG准确率83%，EOG准确率100%；启动时间<2 s；完成10项双手ADL；设置校准<20 min
Tang等[36]	2026年	便携式EEG–TMS闭环系统	可行性研究	健康受试者（n=9）+卒中患者（n=2）	EEG触发cTBS	验证了EEG触发实时控制的可行性

注：NBCI为非侵入式脑机接口；MI为运动想象；RCT为随机对照试验；FMA–UE为Fugl–Meyer上肢功能评估量表；ARAT为上肢动作研究测试；tDCS为经颅直流电刺激；FMA为Fugl–Meyer评估量表；SSVEP为稳态视觉诱发电位；FMA–UL为Fugl–Meyer下肢功能评估量表；VR为虚拟现实；MBI为改良巴氏指数；MoCA为蒙特利尔认知评估量表；FES为功能性电刺激；CST为皮质脊髓束；EOG为眼电图；EEG为脑电图；ADL为日常生活活动；TMS为经颅磁刺激；cTBS为连续性θ爆发刺激。

2.3.1 主流NBCI干预范式及其证据

MI–NBCI是目前证据最为充分的经典干预范式，患者根据指令进行手部MI，脑电图ERD/ERS被实时解码并触发视觉/听觉反馈。常规康复联合MI–NBCI在FMA–UE改善上显著优于单纯MI训练[9]，且与MI一致的反馈效果优于非偶联反馈[33]。基于稳态视觉诱发电位（steady–state visual evoked potential, SSVEP）的NBCI利用不同频率闪烁刺激诱发枕叶稳态响应，用户通过注视选择指令，具有无需训练、高信噪比等优点，Guo等[30]已验证SSVEP–NBCI结合软体手套的可行性，但其依赖视觉刺激，不适用于视野缺损患者。事件相关电位（event–related potential, ERP）–NBCI主要利用P300等内源性事件相关电位成分，通常在oddball范式下诱发，通过识别小概率相关事件诱发的正向波峰实现意图解码，可用于训练脑卒中患者言语功能[37]。

2.3.2 NBCI联合其他技术的多模态闭环干预

单一NBCI反馈的疗效可能有限，将其与康复机器人、FES、虚拟现实技术（virtual reality, VR）或神经调控技术等联合，可提供更丰富的本体感觉和运动输出，形成闭环康复系统。

NBCI联合外骨骼/软体机器人是最常见的组合。《非侵入式脑机接口在神经康复临床应用中的专家共识》[38]明确指出，对于脑卒中后上肢中重度运动功能障碍（FMA–UE<40分）患者，推荐在常规康复基础上采用MI–NBCI联合FES或康复机器人/外骨骼进行闭环训练。Cheng等[29]的随机对照试验（randomized controlled trial, RCT）显示NBCI–软体手套组的FMA和ARAT改善在24周内持续存在。Bundy等[28]的居家NBCI–外骨骼单臂试验显示，12周后ARAT平均提高6.2分。Takasaki等[34]的研究显示，为期仅7天的对侧半球NBCI–外骨骼训练即可使慢性期严重偏瘫患者的FMA显著提高。

NBCI联合FES可将解码的运动意图转化为电刺激直接激活瘫痪肌肉，适用于肌肉收缩能力尚存但中枢驱动不足的患者。Chen等[39]的Meta分析显示，NBCI–FES在FMA–UE改善方面优于其他反馈模式，并建议进行持续两周且干预参数为30 min/次、4～5次/周的治疗。Chen等[18]研究发现，NBCI–FES组FMA改善显著优于FES组和对照组，且出血性脑卒中患者响应更佳。在Brunner等[4]的RCT中，NBCI–FES组与常规康复组的ARAT改善无显著差异，提示皮质脊髓束（corticospinal tract, CST）完整性是唯一显著预测因素。两项研究结果的差异提示，干预前进行患者筛选对疗效的影响可能比干预方法本身更重要。

NBCI联合VR可提供沉浸式多感官反馈，不仅能够有效恢复功能，还能提高训练积极性。杨延辉等[22]探索了视觉运动诱导的NBCI–VR对脑卒中患者上肢和认知功能的影响，训练后试验组FMA–UE、改良巴氏指数（modified Barthel index, MBI）和蒙特利尔认知评估量表（Montreal cognitive assessment, MoCA）评分均显著改善，脑参与度上升了21%。但是，VR的额外增效还需通过更多的RCT来验证。

NBCI联合tDCS可通过无创脑刺激技术调节皮层兴奋性，进而增强神经可塑性。Mane等[13]对比了NBCI+tDCS与单纯NBCI的干预效果，发现两组临床改善相似，但干预后NBCI+tDCS组脑对称指数显著改变，NBCI组则以相对θ功率变化为特征，表明不同干预方式存在不同电生理标志物，可为个性化康复方案的选择提供依据。

2.3.3 NBCI与传统康复手段的结合

NBCI技术与现有康复手段的整合应用，可提高疗效。Wang等[32]在17个中心开展的RCT显示，缺血性脑卒中患者接受NBCI训练后1个月FMA–UE改善优于对照组。胡义茜等[31]探索了NBCI联合多模态感知反馈训练对严重偏瘫患者的疗效，12例慢性期患者经干预后FMA–UE和ARAT显著改善。Li等[40]的Meta分析证实NBCI训练可改善FMA–UE和MBI，但对ARAT和肌张力评分效果不显著。

2.3.4 便携式NBCI系统与社区康复

随着脑机接口技术的发展，便携式NBCI系统的研发为康复训练从医院走向社区和家庭提供了一种可能。Colucci等[35]验证了便携式混合脑/神经外骨骼系统恢复双手日常生活活动（activities of daily living, ADL）的可行性。Mahmood等[41]开发的基于VR的便携式NBCI系统同样展示了其在居家环境中的应用潜力。Tang等[36]开发的便携式EEG–TMS闭环系统进一步推进了便携式NBCI的发展，在健康受试者中验证了脑电图触发（EEG–triggered）实时控制的可行性。中国康复医学会手功能康复专业委员会发布的《便携式外骨骼脑机接口应用于社区居家卒中患者上肢康复专家共识（2025年版）》[42]，围绕便携式外骨骼NBCI的作用原理、应用管理、操作规范

等进行了系统阐述，为该技术的推广提供了指导，便携式NBCI有望成为未来卒中康复的重要工具。

3 总结与展望

3.1 现有进展总结

NBCI在脑卒中手功能康复中的应用已从概念验证发展到临床证据积累阶段。现有研究进展和不足可总结如下。

（1）在预后预测方面，已有研究基于不同的信号采集方式识别出多项候选指标，部分已初步显示出与NBCI干预后功能改善的相关性。然而，多数研究样本量小，且为单中心、回顾性分析，尚无候选指标经过多中心前瞻性队列的验证；各研究在范式设计、指标定义和结局评价方面异质性较大。目前该领域仍处于标志物发现的早期阶段，距临床转化尚有一定距离。

（2）在功能评估方面，训练过程中的脑参与度及SMR–ERD可实时反映主动参与程度和皮层激活水平；训练前/后离线计算的CMC网络属性、微状态特征、PMBR/ERD等指标可分别量化中枢–外周耦合效率、MI能力及皮层抑制功能。上述指标与FMA–UE、ARAT等量表的相关性已得到初步验证，但参数采集、分析流程和正常参考值尚未标准化，信效度亦未经系统检验，尚未形成可独立于量表的客观评估体系。

（3）在康复干预方面，多项RCT支持MI–NBCI作为常规康复的补充可用于改善上肢运动功能；NBCI–FES的长期疗效已得到证实；NBCI–外骨骼/软体机器人组合在多项研究中显示出积极效果；便携式NBCI系统的研究展示了居家康复的潜力。然而，各研究在范式选择、训练剂量、对照设置、结局指标等方面高度异质，多数RCT随访期在3个月以内，远期疗效数据有限。

3.2 未来研究展望

针对当前研究的局限性，未来研究可从以下几个方向重点突破。

（1）推进预后预测临床转化与精准分层。开展多中心前瞻性队列研究，对已报道的候选指标进行外部验证，建立标准化采集与分析流程，探索多模态指标的最优整合模型；在此基础上筛选稳定的电生理标志物，结合临床特征构建个体化预测体系，开展基于分层的前瞻性试验，实现患者筛选。

（2）建立标准化评估体系与研究设计规范。系统开展脑信号指标的信效度检验，建立标准化采集流程与参考值范围，探索其与传统量表的整合框架，推动形成独立于主观量表的客观评估体系；同时建立统一的NBCI康复研究报告标准，明确受试者纳入标准、干预参数及结局指标的最低报告要求，降低研究异质性，提高结果可比性。

（3）加强长期随访与卫生经济学评价。延长随访周期，评估NBCI康复疗效的维持时间、远期功能改善程度及生活质量提升水平，分析不同病程/损伤程度的疗效，全面衡量其临床价值及社会效益，为临床推广和医保决策提供依据。

（4）推动便携式与居家康复系统研发。结合软体电极、无线传输、VR等工程技术，开发轻量化、易操作的便携式NBCI系统；开展社区及家庭环境下的可行性、安全性和有效性临床试验；探索远程康复管理和数据监控模式，促进康复服务的有效延续。

利益冲突：作者声明没有利益冲突。

[参 考 文 献]

[1] Feigin V L, Brainin M, Norrving B, et al. World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025[J]. International Journal of Stroke, 2025, 20(2): 132–144.

[2] Ma Q, Li R, Wang L, et al. Temporal trend and attributable risk factors of stroke burden in China, 1990–2019: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. The Lancet Public Health, 2021, 6(12): e897–e906.

[3] Baniqued P D E, Stanyer E C, Awais M, et al. Brain–computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review[J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2021, 18: 15.

[4] Brunner I, Lundquist C B, Pedersen A R, 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]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2024, 21: 10.

[5] 陈琼漩, 李鑫. 非侵入性脑机接口在脑卒中手功能康复中的应用现状[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(11): 1566–1571.

[6] Sun Y, Chen X, Liu B, et al. Signal acquisition of brain–computer interfaces: a medical–engineering crossover perspective review[J]. Fundamental Research, 2025, 5(1): 3–16.

[7] Liu X Y, Wang W L, Liu M, et al. Recent applications of EEG–based brain–computer–interface in the medical field[J]. Military Medical Research, 2025, 12: 14.

[8] Daly J J, Wolpaw J R. Brain–computer interfaces in neurological rehabilitation[J]. The Lancet Neurology, 2008, 7(11): 1032–1043.

[9] 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.

[10] Buch E R, Modir Shanechi A, Fourkas A D, et al. Parietofrontal integrity determines neural modulation associated with grasping imagery after stroke[J]. Brain, 2012, 135(2): 596–614.

[11] Rathee D, Chowdhury A, Meena Y K, et al. Brain–machine interface–driven post–stroke upper–limb functional recovery correlates with beta–band mediated cortical networks [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2019, 27(5): 1020–1031.
[12] Carino–Escobar R I, Carrillo–Mora P, Valdés–Cristerna R, et al. Longitudinal analysis of stroke patients' brain rhythms during an intervention with a brain–computer interface [J]. Neural Plasticity, 2019, 2019: 7084618.
[13] Mane R, Chew E, Phua K S, et al. Prognostic and monitory EEG–biomarkers for BCI upper–limb stroke rehabilitation [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2019, 27(8): 1654–1664.
[14] Lin P J, Jia T, Li C, et al. CNN–based prognosis of BCI rehabilitation using EEG from first session BCI training [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021, 29: 1936–1943.
[15] Carino–Escobar R I, Valdés–Cristerna R, Carrillo–Mora P, et al. Prognosis of stroke upper limb recovery with physiological variables using regression tree ensembles [J]. Journal of Neural Engineering, 2021, 18(4): 046057.
[16] Ma Z Z, Wu J J, Cao Z, et al. Motor imagery–based brain–computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2024, 21: 91.
[17] Lu R, Pang Z, Gao T, et al. Multisensory BCI promotes motor recovery via high–order network–mediated interhemispheric integration in chronic stroke [J]. BMC Medicine, 2025, 23: 380.
[18] Chen S, Xie N, Tang Y, et al. Long–term brain–computer interface functional electrical stimulation enhances neuroplasticity and functional recovery in elderly stroke: a 4.5–year longitudinal study integrating electroencephalography biomarkers and clinical assessments [J]. Research, 2025, 8: 0984.
[19] Ji X, Lu X, Xu Y, et al. Effects and neural mechanisms of a brain–computer interface–controlled soft robotic glove on upper limb function in patients with subacute stroke: a randomized controlled fNIRS study [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2025, 22: 171.
[20] 中国康复医学会脑机接口与康复专业委员会, 吴文, 王祥龙, 等. 脑机接口康复评估临床应用专家共识 [J]. 康复学报, 2026, 36(6): 381–397, 404.
[21] 陈树耿, 束小康, 贾杰. 基于闭环脑机接口的脑卒中患者的手功能康复研究 [J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(11): 1189–1194.
[22] 杨延辉, 王浩冲, 董媛媛, 等. 视觉运动诱导的脑机接口技术应用于脑卒中患者上肢运动功能和认知功能的效果 [J]. 中国康复理论与实践, 2023, 29(4): 472–478.
[23] He J, Yuan Z, Quan L, et al. Multimodal assessment of a BCI system for stroke rehabilitation integrating motor imagery and motor attempts: a randomized controlled trial [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2025, 22: 185.
[24] Pichiorri F, Toppi J, de Seta V, et al. Exploring high–density corticomuscular networks after stroke to enable a hybrid Brain–Computer Interface for hand motor rehabilitation [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2023, 20: 5.
[25] Barios J A, Vales Y, Catalán J M, et al. Post–movement beta rebound for longitudinal monitoring of motor rehabilitation in stroke patients using an exoskeleton–assisted paradigm [J]. International Journal of Neural Systems, 2025, 35(9): 2550044.
[26] Lv S, Ran X, Xia M, et al. Classification of left and right–hand motor imagery in acute stroke patients using EEG microstate [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2025, 22: 137.
[27] Tan F, Qing W, Ip W C, et al. Guided corticomuscular neuroplasticity for restoration of wrist–hand function post–stroke [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2026, 23: 105.
[28] Bundy D T, 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.
[29] Cheng N, Phua K S, Lai H S, et al. Brain–computer interface–based soft robotic glove rehabilitation for stroke [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2020, 67(12): 3339–3351.
[30] 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.
[31] 胡义茜, 高天昊, 白玉龙, 等. 脑机接口联合多模态感知反馈训练对脑卒中后上肢功能恢复的探索性研究 [J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(11): 1457–1462.
[32] Wang A, Tian X, Jiang D, et al. Rehabilitation with brain–computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: a randomized controlled trial [J]. Med, 2024, 5(6): 559–569.e4.
[33] Kim M S, Park H, Kwon I, et al. Efficacy of brain–computer interface training with motor imagery–contingent feedback in improving upper limb function and neuroplasticity among persons with chronic stroke: a double–blinded, parallel–group, randomized controlled trial [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2025, 22: 1.
[34] Takasaki K, Iwama S, Liu F, et al. Rapid functional reorganization of the targeted contralesional hemisphere induced by one week of noninvasive closed–loop neurofeedback guides motor recovery in post–stroke patients with chronic motor impairment: a phase I trial [J]. Communications Medicine, 2026, 6: 163.
[35] Colucci A, Vermehren M, Angerhöfer C, et al. Hybrid brain/neural exoskeleton enables bimanual ADL training in routine stroke rehabilitation [J]. Stroke, 2026, 57(2): 505–510.
[36] Tang Y, Wang Y, Zhang W, et al. Magnetic NeuroRing: a portable adaptive brain–computer interface for real–time transcranial magnetic stimulation in post–stroke motor rehabilitation [J]. npj Biomedical Innovations, 2026, 3: 4.
[37] Sellers E W, Ryan D B, Hauser C K. Noninvasive brain–computer interface enables communication after brainstem stroke [J]. Science Translational Medicine, 2014, 6(257): 257re7.
[38] 中国康复医学会脑机接口与康复专业委员会, 马骏, 张晶晶, 等. 非侵入式脑机接口在神经康复临床应用中的专家共识 [J/OL]. 康复学报, 2026–02–24. https://link.cnki.net/urlid/35.1329.R.20260224.1500.002.
[39] Chen H, Yun G. Efficacy of brain–computer interface therapy for upper limb rehabilitation in chronic stroke: systematic review and meta–analysis of randomized controlled trials [J]. Journal of Medical Internet Research, 2026, 28: e79132.
[40] Li D, Li R, Song Y, et al. Effects of brain–computer interface based training on post–stroke upper–limb rehabilitation: a meta–analysis [J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2025, 22: 44.
[41] Mahmood M, Kim N, Mahmood M, et al. VR–enabled portable brain–computer interfaces via wireless soft bioelectronics [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2022, 210: 114333.
[42] 中国康复医学会手功能康复专业委员会, 中国康复医学会社区康复工作委员会, 贾杰. 便携式外骨骼脑机接口应用于社区居家卒中患者上肢康复专家共识（2025年版）[J]. 中国卒中杂志, 2025, 20(10): 1210–1221, 1209.