



· 专题论坛 | 指南与共识 ·

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)

■ 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

基金项目

国家重点研发计划

(2018YFC2002301)

福建省科技创新联合

资金项目 (2021Y9130)

上海市2024年度“科技创新

行动计划”养老科技支撑

专项项目 (24YL1900200)

通信作者单位

福州 350005

福建医科大学附属第一

医院康复医学科

福州 350212

福建医科大学附属第一

医院滨海院区国家区域医疗

中心

上海 20040

复旦大学附属华山医院康

复医学科

通信作者

贾杰

shannonjj@126.com

【摘要】 卒中社区康复是卒中患者全周期康复中的重要阶段, 康复脑机接口作为新兴的康复技术, 受到社会的广泛关注。随着多样化康复脑机接口技术的研发和应用, 未来便携式外骨骼脑机接口设备将更广泛地进入社区与家庭。为此, 中国康复医学会手功能康复专业委员会与中国康复医学会社区康复工作委员会联合手功能康复、神经康复、社区康复等多学科专家, 制定了《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)》。本共识围绕便携式外骨骼脑机接口的作用原理, 及其在社区居家卒中患者上肢康复中的应用及管理等方面展开讨论, 旨在为社区居家卒中患者进行基于便携式外骨骼脑机接口的上肢康复训练提供系统化指导, 助力该技术的推广, 并为相关研究与实践提供参考和依据。

【关键词】 便携式外骨骼脑机接口; 康复; 上肢功能; 社区; 专家共识

【中图分类号】 R74; R49

【DOI】 10.3969/j.issn.1673-5765.2025.10.002

Expert Consensus on the Application of Portable Exoskeleton Brain-Computer Interface in Upper Limb Rehabilitation of Stroke Patients at Home in the Community (2025 Edition)

Hand Functional Rehabilitation Professional Committee of the Chinese Association of Rehabilitation Medicine, Community Rehabilitation Working Committee of the Chinese Association of Rehabilitation Medicine. Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital, Fujian Medical University, Fuzhou 350005, China; Department of Rehabilitation, National Regional Medical Center, Binhai Campus of the First Affiliated Hospital, Fujian Medical University, Fuzhou 350212, China; Department of Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China

Corresponding Author: JIA Jie, E-mail: shannonjj@126.com

【Abstract】 Community-based stroke rehabilitation is an important stage in the full-cycle rehabilitation of stroke patients. Brain-computer interface, as an emerging rehabilitation technology, has attracted widespread attention from the society. With the development and application of diverse brain-computer interface rehabilitation technologies, a wider range of portable exoskeleton brain-computer interface devices will enter communities and homes in the future. To this end, the Hand Functional Rehabilitation Professional Committee of the Chinese Association of Rehabilitation Medicine and the Community Rehabilitation Working Committee of the Chinese Association of Rehabilitation Medicine, together with multidisciplinary experts from hand functional rehabilitation, neurological rehabilitation, and community rehabilitation, have formulated the *Expert Consensus on the Application of Portable Exoskeleton Brain-Computer Interface in Upper Limb Rehabilitation of Stroke Patients at Home in the Community (2025 Edition)*. This consensus explores the working principles of portable exoskeleton brain-computer interface, its application in upper limb rehabilitation of stroke patients at home in the community, and related application management. It aims to provide systematic guidance for upper limb rehabilitation training based on brain-computer interface for stroke patients at home in the community, facilitate the promotion of this technology, and provide a reference for relevant research and practice.

【Key Words】 Portable exoskeleton brain-computer interface; Rehabilitation; Upper limb function; Community; Expert consensus

卒中社区康复是卒中患者在三级医院完成急性期治疗后进入的另一个重要康复阶段^[1]。社区康复对卒中患者上肢功能及日常生活活动能力的恢复具有显著的远期作用。当前,社区层面的卒中上肢康复已取得一定成效,其主流治疗方法是以运动疗法、电刺激等物理治疗方法为代表的传统康复技术。然而,传统康复技术多关注症状本身,忽视了症状背后的整体性问题,且多为单向输入,缺少互动性,导致患者在康复过程中常处于被动接受治疗的状态^[2-3]。因此,长期的社区居家康复可能使患者失去训练的耐心和信心,影响其康复积极性和参与度。随着科技的发展与进步,卒中康复领域涌现出多项创新技术(如脑机接口、经颅磁刺激、经颅超声等),这些技术在提高干预精准性、激活神经可塑性、提升患者积极性等多个方面展现出了显著优势^[4]。

便携式外骨骼脑机接口作为非侵入式脑机接口的一种,目前已从实验室阶段进入临床应用阶段^[5]。随着技术的完善与普及,未来将有更多便携式外骨骼脑机接口康复产品应用于临床并进入社区与家庭。在此背景下,有必要对我国便携式外骨骼脑机接口的社区居家应用进行规范。为此,中国康复医学会手功能康复专业委员会与中国康复医学会社区康复工作委员会联合多学科专家,结合我国上肢康复机器人及脑机接口技术在卒中后上肢运动障碍患者康复治疗中的应用特点,参考最新研究与已发表的指南或共识,围绕便携式外骨骼脑机接口的作用原理,及其在社区居家上肢康复中的应用(适用人群、训练作用参数、整体应用流程及治疗安全)及应用管理(社区资源整合与培训、信息化管理、与社区既有康复手段的融合及居家康复适配)等方面展开讨论。专家组通过系统检索临床研究数据、评价临床证据及判断证据质量,制定了《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)》。共识旨在为社区居家卒中上肢运动障

碍患者应用便携式外骨骼脑机接口设备进行康复训练提供系统化、标准化的指导,促进该技术在社区及临床实践中的应用与推广,并为其相关研究和实践提供参考。

1 共识制订的流程与方法

共识的制订工作由中国康复医学会手功能康复专业委员会及中国康复医学会社区康复工作委员会于2025年1月发起,于2025年3月正式启动。共识工作组由专家委员会、共识制订小组及秘书组构成,涵盖手功能康复、神经康复、社区康复、工程学、康复护理等多学科专家。

共识制订小组遵照循证医学方法,采用主题词与自由词相结合的检索策略,系统检索PubMed、Embase、Cochrane Library、中国期刊全文数据库、万方数据知识服务平台和中国生物医学文献服务系统等数据库,并对纳入的文献进行质量评价。检索时限为建库起至2025年3月1日。纳入文献标准:①以卒中后存在上肢运动障碍的患者为研究对象;②研究设计为临床随机对照试验、病例对照研究、观察性研究、专家共识及应用指南、系统评价及meta分析;③干预措施为上肢外骨骼康复机器人治疗技术和(或)上肢脑机接口治疗技术;④报告了治疗过程中的安全性问题及处理措施等。依据证据推荐、评估、发展和评价等级(grades of recommendation, assessment, development, and evaluation; GRADE)方法,对纳入的文献进行质量评价。

依据质量评价结果,秘书组结合我国临床实践与康复资源情况拟定共识初稿,随后组织专家委员会成员召开线上共识会议,对推荐意见进行逐条研讨,经修改后形成本共识。本共识已通过国际实践指南注册与透明化平台注册,注册号为PREPARE-2025CN830。

本共识主要适用于出血性或缺血性卒中所致上肢运动障碍患者在社区居家环境下的便携式外骨骼脑机接口治疗,旨在为上肢运动障



碍患者应用此技术进行社区居家康复治疗提供临床循证医学证据,并提出具体的应用建议。

2 便携式外骨骼脑机接口的作用原理

便携式外骨骼脑机接口属于非侵入式脑机接口的一种,主要通过脑电图等技术采集大脑皮质活动的电生理信号,并利用机器学习算法解码患者的运动意图^[6],是连接大脑与外部设备的桥梁。例如,患者想象上肢运动时产生的脑电图特征可被识别并转化为控制指令,驱动外骨骼完成想象的具体任务,形成“意图-反馈”闭环。脑机接口康复技术基于以上反馈路径,通过反复的“运动想象-设备响应”训练,促进患者受损的神经网络激活并重组,同时使训练过程更加贴合患者的实际需求和运动意愿。研究表明,非侵入式脑机接口训练可增强卒中患者脑功能网络的连接性(如平均度增加、路径长度缩短),并促进运动相关脑区(如中央前回、前额叶)的活动,从而加速患者的神经功能恢复^[7-8]。

目前,临床上应用的外骨骼脑机接口设备主要由生物电采集处理部件(脑电帽与控制盒)、训练部件(关节活动器)及适配器构成^[9]。使用时,脑电帽与控制盒通过磁吸连接,并经蓝牙与关节活动器连接。脑电帽、控制盒和关节活动器为产品的应用部分。部分外骨骼脑机接口设备具备轻量化、可穿戴、易操作的特点,适用于社区居家康复。随着产业链的完善,以便携式外骨骼脑机接口设备为媒介的康复技术可及性将逐步提高,有助于社区居家患者获得更便捷、有效的康复手段^[10-11]。

3 便携式外骨骼脑机接口在社区居家卒中患者上肢康复中的应用

卒中分级诊疗全周期中的“社区拐点康复”理念强调,社区康复等基层医疗服务在卒中患者的全周期康复中具有重要的延伸作用,其实施成效直接影响卒中患者回归社会与家庭后的

生活质量。该理念的特点是将院内康复训练延伸至社区与家庭,构建卒中全周期康复的良性可持续介入模式^[1, 12]。在社区康复阶段,便携式外骨骼脑机接口设备主要应用于社区卫生服务中心及家庭,使患者在社区中即可获得专业的康复技术支持,从而维持其卒中后康复的连续性与长期性。

在此场景下,社区康复工作者需明确患者的功能状态,如通过“大型医院或专科医院-县(区)级地方医院-社区等基层医疗机构”三级医疗转介系统,获取患者既往的脑电训练数据、功能情况等信息。在实施康复训练时,社区康复工作者应设计侧重于改善患者日常生活活动能力的训练范式,构建生活化的康复模式,以实现患者在社区或家庭中的个性化康复。

3.1 适用人群

便携式外骨骼脑机接口驱动原理的核心是捕捉和解析与运动想象相关的神经电活动,并将其转化为可执行的控制指令。因此,患者需具备一定的认知水平和运动想象能力,以驱动设备完成不同的训练任务。此外,佩戴脑电帽与外部设备时要求患者皮肤无破损,且能在训练中无障碍、无不良反应地使用设备。基于脑机接口训练对患者的要求及制订后续训练方案的需要,建议围绕患者的卒中分期、运动想象能力、肌张力、上肢和手功能情况、注意力及认知水平等进行全面评估,以明确其是否适用该技术,并确定训练作用参数与训练任务,以便更合理地开展该设备驱动的上肢功能训练并预防不良事件的发生^[13]。

3.1.1 卒中分期评估

Brunnstrom分期主要用于偏瘫患者的运动功能评定(表1),其在社区居家康复中应用,可协助康复治疗师快速掌握患者上肢和手功能的康复进展情况^[14]。

3.1.2 运动想象能力评估

手部心理旋转测试与动觉和视觉运动想象问卷20项(kinesthetic and visual-motor

imagery questionnaire-20, KVIQ-20) 中文版均可用于评估卒中患者的运动想象能力(表2)。

手部心理旋转测试以一系列不同方位的手部二维图片作为测试材料,要求患者判断图片上不同旋转角度的手部为左手还是右手,并记录其判断1组图片的耗时及准确率^[15-16]。

KVIQ-20中文版聚焦运动想象中的动觉与视觉想象能力评估。在检查者的指导下,患者需对20个项目(10项动作)进行动觉和视觉想象,并对其难易程度与清晰程度进行自我评分。自我评分越高,表明患者的运动想象能力越强^[17-18]。

3.1.3 肌张力评估

改良Ashworth量表是评估肌肉痉挛程度的常用方法^[19](表3)。在便携式外骨骼脑机接口设备应用过程中,改良Ashworth量表评定可同时用于功能与安全性评估。从功能评估角度,改良Ashworth量表可评估卒中患者的肌肉痉挛状态对设备驱动及运动功能恢复的影响;从安全性评估角度,改良Ashworth量表>2级的患者使用外骨骼设备可能会引起继发性损伤(如关节损伤)或设备操作受阻。

表1 Brunnstrom分期
Table 1 Brunnstrom stages

部位	分期	标准
上肢	I期	弛缓,无随意运动
	II期	开始出现痉挛,肢体共同运动
	III期	随意出现的共同运动
	IV期	共同运动模式被打破,开始出现分离运动
	V期	肌张力逐渐恢复,有分离精细运动
	VI期	运动接近正常水平
手	I期	弛缓,无随意运动
	II期	稍出现手指活动
	III期	能全指屈曲、钩状抓握,但不能伸展,有时可反射性引起伸展
	IV期	能侧捏及拇指松开,手指能半随意、小范围地伸展
	V期	能用手掌抓握,但不熟练,能随意全指伸开,但范围大小不等
	VI期	能进行各种抓握、全范围地伸指,但比健侧稍差

表2 动觉和视觉运动想象问卷(中文版)
Table 2 Kinesthetic and visual-motor imagery questionnaire (Chinese version)

运动动作	动觉想象	视觉想象
颈部屈/伸	1K	1V
耸肩	2K	2V
肩前屈	3Knd	3Vnd
屈肘	4Kd	4Vd
对指	5Kd	5Vd
躯干前屈	6K	6V
伸膝	7Knd	7Vnd
髋关节外展	8Kd	8Vd
脚打拍子	9Knd	9Vnd
足外旋	10Kd	10Vd

动觉想象得分				
5分	4分	3分	2分	1分
如执行动作一样强烈	感受强烈	中度感受	轻度感受	没有感受

视觉想象得分				
5分	4分	3分	2分	1分
如看见一样清晰	能清晰地想象	中度清晰地想象	模糊地想象	不能想象

注:检查者指导患者摆出合适的初始体位,在坐位姿势下按顺序执行上述动作1次,随后恢复初始体位,并在不实际执行的情况下想象刚才完成的动作。最后,患者需按照上述5分制评分表格自评动觉想象或视觉想象的强度。K——动觉想象;V——视觉想象;nd——非优势侧;d——优势侧。

表3 改良Ashworth量表
Table 3 Modified Ashworth scale

痉挛程度	评定标准
0级	无肌张力增高
1级	肌张力轻微增高:受累部分被动活动时,在关节活动度终末端突然卡住,然后呈现最小的阻力或释放
1 ⁺ 级	肌张力轻度增高:受累部分被动活动时,在关节活动度后50%范围内突然卡住,然后均呈现最小的阻力
2级	肌张力较明显增高:受累部位被动活动时,在大部分关节活动度内肌张力均较明显增加,但仍可较为容易地活动
3级	肌张力严重增高:受累部位被动活动时,在整个关节活动度内均有阻力,活动比较困难
4级	僵直:受累部分被动活动时呈现僵直状态,不能活动



3.1.4 上肢运动功能评定

在确定康复治疗方案前,康复治疗师应对患者的运动功能进行整体评估。建议采用Fugl-Meyer运动功能评定量表上肢部分作为基础评估工具;有条件的社区还可进一步评估患者的手功能整体协调性,如采用上肢动作研究测试(action research arm test, ARAT)等。

Fugl-Meyer运动功能评定量表上肢部分评估涵盖了上肢运动的多个方面,包括反射活动、屈肌协同运动、伸肌协同运动、伴有协同运动的活动、分离运动、反射亢进、腕稳定性、肩前屈30°时肘伸直、手指运动及协调运动能力与速度等。该量表共包含33个评估项目,每个项目根据患者的完成情况给予0分、1分或2分,总分为66分^[20-22]。

ARAT主要用于评估上肢功能的恢复情况,涉及抓握、握力、前臂旋转、肘部和肩部运动等多个方面。评估前,患者接受基本训练以熟悉评估过程。评估时,患者按照特定的顺序依次完成19项不同的任务,每个任务的时间限制为60 s。评估者结合动作速度、准确性和协调性等因素,对患者每项任务进行综合评分:若患者仅能完成抬高桌面等部分初始动作,给予1分;若能在60 s内完成动作,但动作慢或笨拙地代偿完成,给予2分;若能在5 s内无代偿完成,给予3分。此外,若于测试第1项(最难)得分为3分,则该子测试所有项目为满分;若于测试第1项低于3分,则进行第2项(最简单)测试;若第2项测试得分为0分,则该子测试总分为0分^[23-24]。

3.1.5 上肢感觉功能评估

除了对运动功能的精细评定外,感觉功能评估也是制订康复计划前的核心要点之一。社区康复可选择改良诺丁汉感觉功能评价(revised Nottingham sensory assessment, reNSA)量表来评估患者的各类感觉异常及其严重程度。

reNSA量表是用于评估感觉功能的标准

化工具,尤其适用于卒中患者感觉功能和感觉治疗效果的评估。该量表包含多项与感觉功能相关的评估条目,例如,通过轻触皮肤来评估患者的触觉感知,使用温度刺激来评估患者对冷或热的感知,使用细针轻刺皮肤来评估患者的痛觉感知,通过施加压力来评估患者的压力感知,通过被动活动肢体来评估患者对肢体位置和运动的感知,通过触摸物体来评估患者的实体感知等^[25-27]。

3.1.6 注意力测试

运动想象相关康复训练的有效执行高度依赖患者的注意力水平。舒尔特方格注意力测试是一种经典且简单的注意力评估和训练工具,其优势在于操作简单、耗时短、无设备依赖。最常见的舒尔特方格注意力测试采用5×5方格(共25个格子),尤其适用于社区及家庭评估。测试时,患者用手依次寻找并点击数字1~25的位置,同时读出所点击数字,测试者记录患者点击25个数字所需的时间。建议进行3~5次测试,取平均值来代表患者的注意力水平。完成测试所需的时间越短,患者的注意力水平越高^[28]。

3.1.7 认知评估

MoCA是用于快速评估认知功能的工具,总分为30分。对于受教育年限在12年及以下的患者,通常在总分基础上加1分,以校正教育背景对评估结果的影响^[29]。

一般认为Brunnstrom分期为I~IV期、KVIQ-20评分≥55分且无明显认知障碍的患者适合开展便携式外骨骼脑机接口训练。与此同时,康复治疗师需综合考量上述评估结果,设置符合患者功能水平的训练任务。

若患者存在精神异常,生命体征不稳定,肌张力过高(改良Ashworth分级>2级),骨关节肿瘤,植入心脏起搏器,各类上肢关节/软组织运动损伤后急性期,不稳定心绞痛,急性心肌梗死,高血压控制不佳[收缩压≥180 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)和(或)舒张压≥110 mmHg],上肢或头皮表面破损与伤口感染,上肢肢体缺

如,严重的心、肝、肾功能不全及感染,各种出血倾向,癫痫发作期,严重器质性疾病等不能耐受训练的情况,以及社区康复工作者认为其存在不适宜进行康复训练的其他情况,则不建议应用便携式外骨骼脑机接口进行康复训练。

3.2 训练作用参数

便携式外骨骼脑机接口训练对卒中患者的上肢康复效果与训练时长和频率存在一定关联。既往研究显示,高频率(>5次/周)的脑机接口治疗可在较短时间内改善卒中患者的上肢运动功能,而频率较低(<3次/周)的脑机接口治疗通常需要患者坚持更长时间的训练才能获得一定的疗效。建议单次治疗时间为30~40 min,运动想象训练次数为100~150次。社区康复相较于医院康复更具灵活性、持续性和社区支持性,因此社区及居家康复的治疗频率可适当降低,每周3~5次训练即可。可适当延长每次康复训练的时长,但训练中需通过更精准化的方案设计与常态化的干预整合以维持疗效^[30-32]。

在实际应用中,脑机接口治疗频率与时长的制订需结合社区居家卒中患者的特点综合考量。社区居家卒中患者多处于疾病慢性期,生命体征相对稳定,康复训练具有长期性。因此,社区康复工作者应合理安排各项治疗的频率,以实现协同增效。此外,社区康复工作者应综合考虑患者康复训练前后的疲劳程度,灵活调整训练时长,可阶段性进行疲劳测试,以调整适合患者的最佳训练时长及频率。

3.3 整体应用流程

社区康复工作者应结合上级医院的患者转诊信息,通过对回归社区与家庭的卒中患者进行Fugl-Meyer运动功能评定量表上肢部分和日常生活活动能力评估,明确患者的个体功能基线情况。随后,根据个体功能基线情况,对患者家属及照护者进行相关宣教,并开展便携式外骨骼脑机接口操作的培训。同时,应定期反馈患者的训练情况并进行针对

性调整,建议每2周进行1次进展评估,根据评估结果动态优化训练计划^[33]。可遵循以下流程进行社区居家卒中患者的便携式外骨骼脑机接口训练。

治疗前评估:除前文介绍的对患者肢体功能的评估外,还需要了解患者的病史、心理健康状况及其回归社区与家庭后的照护情况,全面了解患者的实际情况与个人康复需求,以及现阶段亟需改善与解决的作业问题^[34],以制订合理的社区居家康复训练方案。

治疗前准备:需要向患者及其家属详细介绍便携式外骨骼脑机接口技术并开展相关培训。确保其理解脑机接口设备的使用方法、与外接设备或执行任务间的沟通互动,以及治疗过程中可能出现的不适,同时采取适当的安全措施并提供必要的辅助支持。

治疗过程:根据患者的具体需求制订康复计划。照护者实时监测患者的训练进展和反应,并及时反馈给社区康复工作者,以确保任务难度与患者当前的康复水平相匹配。

治疗后报告:社区康复工作者结合治疗过程中的反馈,定期进行居家随访,对患者的训练进展进行详细评估和记录,包括对患者处理感觉输入和执行运动任务时的反应进行详细的作业分析,以便后续调整治疗策略。

定期评估:社区康复工作者定期对患者进行全面的评估,以准确把握其整体康复状况及下一步康复训练的方向。重点评估患者在感觉整合和运动功能方面的进步,并将功能提升进一步转化为患者社区居家日常生活活动能力的改善^[35]。

3.4 治疗安全

便携式外骨骼脑机接口设备涉及设备、康复治疗师、患者及居家照护者的多方交互,是一种涵盖“人-机器人-环境”的复杂人因系统。这一人因系统的首要任务是保障“人”的安全,提升人机交互的安全性。非侵入式的脑电采集模式安全性较高,既往外骨骼脑机接口的相



关临床研究所报道的不良事件较少。然而,影响外骨骼脑机接口使用安全性的潜在因素较多,如系统自身的稳定性、康复训练任务的设置、运动与力的柔顺控制策略、设备类型、疾病类型及患者残存功能状态等。因此,在社区居家环境中,仍需重视严格的安全性评估和应急处理操作培训。

3.4.1 选择适宜的脑电帽类型与外骨骼设备类型

①便携式外骨骼脑机接口所采用的脑电帽主要有盐水电极帽与导电膏电极帽,其中盐水电极帽具有操作方便、易清洗等优势,因此接受度较高。日常生活活动能力较低的居家卒中患者可选用盐水电极帽进行训练。②根据不同的训练要求,配置的脑电帽电极数量也不同。电极数量越多,其采集的脑电数据空间分辨率越高,对信号来源的定位越精准,因此临床研究中多采用32导联以上的脑电帽。然而在社区居家长期应用中,电极数量多可能增加佩戴难度,并降低舒适度。为提高仪器的便携性与用户体验,便携式产品会通过算法优化(如机器学习)弥补电极数量不足所带来的缺陷。因此,实际应用时应权衡使用场景、信号处理能力及用户舒适度等多方面因素,选择适用的脑电帽类型。③上肢外骨骼设备因所需关节数量、自由度、驱动方式等不同而有所差异。便携式外骨骼设备多为单关节或局部外骨骼,可对特定关节功能障碍实现针对性驱动(如通过外骨骼驱动帮助远端手功能受限的患者进行手指伸展和抓握)。因此,社区居家卒中患者对上肢外骨骼设备的选择应结合设备的技术特性、自身的医学评估结果及生活需求综合考虑,以促进功能恢复、提升生活质量为核心目标,而非功能越复杂越好。

3.4.2 风险评估

由专业人员进行设备应用的安全性风险评估,通过监测不良反应的发生情况,评估便携式外骨骼脑机接口设备治疗的安全性。便携式

外骨骼脑机接口设备结合了脑机接口技术与外骨骼机械结构,因此,在日常社区居家训练过程中,需格外关注外骨骼设备的支架、关节部件及脑电设备对患者可能造成的机械损伤与压力性损伤,以及设备助力强度可能导致的肌肉过度疲劳。同时,还应关注治疗中是否存在错误的代偿性运动模式、肌肉保护性痉挛等情况。

社区康复工作者或照护者应关注患者训练后是否存在上述异常,并记录训练关节的痉挛情况(痉挛次数及程度),以及与脑电帽及关节活动器接触的局部皮肤情况(有无破溃、红肿、疼痛等)。需按照不良反应的严重程度进行分类处理:如轻微的皮肤红肿可在松解训练设备后通过冷敷缓解,此类情况可居家处理;如出现较为严重的痉挛等症状,则应联系社区医务人员进行专业干预。

3.4.3 操作与培训

对社区康复工作者开展设备操作培训,要求其从专业知识、技术操作、患者评估等维度掌握便携式外骨骼脑机接口设备的使用方法,并具备对照护者开展宣教和提供专业支持的能力。首先,社区康复工作者应当理解脑机接口如何通过神经反馈机制促进功能重建,明确便携式外骨骼脑机接口在整体康复计划中的定位,了解设备的硬件和软件工作原理,理解运动意图解码过程,例如,外骨骼脑机接口是通过机器学习算法识别患者的脑电模式,并将其转化为外骨骼的关节活动;其次,社区康复工作者应学会正确佩戴脑电帽及外骨骼设备,确保电极与头皮接触良好、外骨骼关键点与患者解剖位点对齐,在训练中正确引导患者进行运动想象任务;最后,社区康复工作者应具备灵活运用专业知识进行相关康复评估的能力,结合患者的功能水平设定目标,分阶段设计训练任务,并与患者进行有效沟通,完成患者和照护者教育。在社区开展便携式外骨骼脑机接口治疗时,应确保参与的医务人员具备从理论知识到应急处理的专业能力。

4 便携式外骨骼脑机接口在社区居家卒中患者上肢康复中的应用管理

4.1 社区资源整合与培训

建议社区康复机构与三甲医院医务人员建立远程会诊机制,与设备厂家的技术团队建立技术支持协作关系,配置具备便携式外骨骼脑机接口设备操作能力的康复工作者或其他相关人员,确保技术实施的规范性。同时,在社区层面推广的模块化设备,应支持快速适配不同患者需求,且具备支持社区进行个性化及家庭指导康复干预的能力。

4.2 信息化管理

对于有技术条件支撑的社区,可利用云平台记录患者的训练数据(如脑电信号、评分变化)并进行跨机构数据共享和疗效追踪。一方面,信息互联有助于上下级医护人员协同制订更精准的训练方案,提升医疗质量与协作效率。另一方面,借助信息化管理可获取应用端需求,有助于指导技术端行业产品的升级迭代。

4.3 与社区既有康复手段的融合

协同增效策略:结合社区既有的传统康复训练方式,在便携式外骨骼脑机接口训练后,对患者辅以关节活动度训练或肌肉按摩,缓解痉挛并增强肌力,以实现协同增效。

阶段性替代:对于传统康复效果不佳的重度功能障碍患者,可将便携式外骨骼脑机接口作为主要干预手段,基于患者的主动参与,逐步替代单纯的被动器械训练。

4.4 居家康复适配

在居家康复应用中形成“专业指导-家庭执行-社区补充”闭环,实现便携式外骨骼脑机接口训练的连续性、可及性和个性化。居家患者定期于社区机构进行肢体功能评估,获取相关康复指导意见,回归家庭后长期执行训练,在训练过程中与社区建立技术指导联系,由患者及其照护者执行日常训练,强调康复训练的自主性和持续性。

5 总结与展望

便携式外骨骼脑机接口技术因其安全性高、对人体无直接伤害及可及性强等特点,在众多医疗应用场景中成为了优选方案,尤其适用于社区场景下的长期康复管理^[36]。这种技术不仅有助于减轻患者的医疗负担,还提高了康复治疗的便捷性和持续性。便携式外骨骼脑机接口技术的出现,更是为卒中患者的社区康复提供了一条创新且高效的路径,使患者能够在家庭或社区环境中接受个性化的康复干预,极大地提高了康复过程的灵活性和患者的舒适度^[37]。

尽管便携式外骨骼脑机接口技术前景广阔,其推广和应用仍需谨慎考虑多方面因素。技术成熟度是首要条件,确保技术的稳定性和可靠性是赢得医务人员和患者信任的基础。成本效益分析同样至关重要,如何在保证治疗效果的同时降低患者的经济负担,是实现技术普及的关键^[38-40]。此外,现有推荐方案多基于临床院内研究,为制订更适用于社区居家卒中患者的治疗方案,需开展不同的对比研究以确定最佳治疗剂量,从而进一步完善社区居家卒中患者应用便携式外骨骼脑机接口的个性化康复治疗方

案。未来,为了更全面地评估便携式外骨骼脑机接口技术在卒中社区康复中的长期疗效与社会价值,有必要开展大规模临床研究、社区试点项目及家庭康复反馈调查。这些实证研究不仅能进一步验证该技术的有效性和安全性,还能为优化技术应用策略、制订更科学合理的康复方案提供有力依据,从而推动该技术更好地服务于社区居家卒中患者,提升其生活质量^[41]。

作者贡献 确定指南工作的思路和计划,负责执行管理和协调,参与指南制订的流程讨论、内容安排决策、证据和推荐论证,对重要的知识内容进行审查、修订,或最终定稿(贾杰、燕铁斌、郑洁皎、石秀娥、郑献召);对研究工作全面负责,确保论文的准确性和诚信,筹措、提供研



究资金(贾杰);获取数据,分析或解释数据,起草、撰写、修改论文,参与指南制订的流程讨论(张舒阳、贺新源、吴理剑、郭子奇、何志杰)。

利益冲突 上海市念通智能科技有限公司在本共识制订过程中,从技术层面上提供了康复脑机接口的应用参考。

撰写组成员

张舒阳 福建医科大学附属第一医院康复医学科,福建医科大学附属第一医院滨海院区国家区域医疗中心
贺新源 河南医药大学第一附属医院康复医学科
吴理剑 福建医科大学附属泉州第一医院康复医学科
郭子奇 复旦大学附属华山医院康复医学科
何志杰 复旦大学附属华山医院康复医学科

专家组成员

主审专家

贾杰 复旦大学附属华山医院
燕铁斌 中山大学孙逸仙纪念医院
郑洁皎 复旦大学附属华东医院
石秀娥 陕西省康复医院
郑献召 焦作市人民医院

论证专家(按姓氏拼音排序)

陈剑 金堂县第一人民医院
陈瑞全 安徽中医药大学第一附属医院
陈万强 兰州大学第一医院
陈瑶 上海市第三康复医院
程子翠 泰安市中医医院
褚延利 宁夏第五人民医院
邓家富 三明市中医院
邓小蕾 莱州市人民医院
翟宏伟 徐州市中心医院
董新春 江苏医药职业学院
杜爱卿 金华颐连金帆康复医院
费燕琼 上海交通大学
高崇 天津市滨海新区海滨人民医院
葛俊胜 深圳市大鹏新区南澳人民医院
葛童娜 慈溪市人民医院医疗健康集团
古丽达娜·阿勒泰地区中医医院
安那斯汗
郝又国 同济大学附属普陀人民医院
胡斌 齐齐哈尔医学院附属第二医院
吉万祥 苏州科技城社区卫生服务中心
姜宝印 湖南省梅溪湖康复医院

金海鹏 厦门市中医院
李辉 福建昌财医院
李洁 同济大学
李丕慈 苍南县中医院
李世英 邯郸市中心医院
李素梅 包头医学院第二附属医院
李珠华 福建省福清市医院
刘江波 运城市人民医院
刘静 南华大学附属第一医院
刘强 广西壮族自治区人民医院
刘玉琪 福建医科大学附属第二医院
刘元标 南京医科大学第二附属医院
罗伦 成都市第二人民医院
孟建军 上海交通大学
牟杨 重庆大学附属涪陵医院
邱纪方 浙江康复医疗中心
邵森 浙江中医药大学附属杭州西溪医院
束小康 上海念通智能科技有限公司
宋振华 海口市人民医院
苏国强 瑞安市人民医院红十字分院
苏洪敏 南岸区中医院
孙祎 乌鲁木齐市友谊医院
涂美 绵阳市中心医院
王嘉麟 北京中医药大学东方医院
王金宇 柳州市中医医院
王景信 郑州大学附属郑州中心医院
王俊 上海市长宁区仙霞街道社区卫生服务中心
王凯杰 唐山市工人医院
王顺达 陕西省人民医院
王业本 济南市第三人民医院
魏新萍 闵行区梅陇社区卫生服务中心
吴戈 中国科学技术大学附属第一医院涡阳分院
吴晓刚 甘肃中医药大学第四附属医院
吴野 徐州市儿童医院
吴雨梅 深圳平乐骨伤科医院
夏菁 上海市普陀区人民医院
谢莉 运城市人民医院
徐建红 昆山市巴城镇正仪社区卫生服务中心
徐丽 电子科技大学附属医院·四川省人民医院
徐燕忠 宏信健康医疗集团

许 胜 金华市第二医院
薛 芬 南阳市第一人民医院
鄢 茵 南昌大学第一附属医院
闫 琳 塔城市人民医院
严 文 佛山市第五人民医院
杨 芳 浙江中医药大学
杨能钢 重庆市沙坪坝区双碑街道社区
卫生服务中心
杨延辉 陕西省康复医院
姚东陂 北京朝阳中西医结合急诊抢救医院
姚黎清 昆明医科大学第二附属医院
叶 亮 杭州市临平区中西医结合医院
尹 清 陆军军医大学第二附属医院
尹新华 宁夏回族自治区人民医院
于惠贤 首都医科大学附属北京天坛医院
袁 丽 西南医科大学附属医院
张 舸 洛阳市中心医院
张见平 上海市普陀区利群医院
张坤华 山东省第一康复医院
张 敏 甘肃省人民医院
张仁智 松滋市流水镇卫生院
张三军 焦作市人民医院
张为民 长春中医药大学附属第三临床医院
张锡铎 深圳中海医院
赵盛惠 重庆市沙坪坝区陈家桥医院, 重庆
医药高等专科学校附属医院
郑金玲 大连医科大学附属第二医院

参考文献

- [1] 贾杰. 脑卒中全周期康复的思考与策略[J]. 中国全科医学, 2025, 28 (2) : 129-134.
JIA J. Reflections and strategies for full-cycle stroke rehabilitation[J]. *Chinese General Practice*, 2025, 28 (2) : 129-134.
- [2] YANG X W, SHI X B, XUE X L, et al. Efficacy of robot-assisted training on rehabilitation of upper limb function in patients with stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2023, 104 (9) : 1498-1513.
- [3] LANGHORNE P, COUPAR F, POLLOCK A. Motor recovery after stroke: a systematic review[J]. *Lancet Neurol*, 2009, 8 (8) : 741-754.
- [4] 孟琳, 黄丹, 刘洪红, 等. 脑卒中康复治疗新技术研究进展[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2017, 17 (3) : 171-175.
MENG L, HUANG D, LIU H H, et al. Research progress of new technologies in stroke rehabilitation[J]. *Chin J Contemp Neurol Neurosurg*, 2017, 17 (3) : 171-175.
- [5] 卢岩, 潘黎姿, 严舒, 等. 脑机接口全球临床试验注册现状分析[J]. 中国医疗设备, 2025, 40 (3) : 16-21.
LU Y, PAN L Z, YAN S, et al. Analysis of global clinical trial registration status for brain-computer interface[J]. *China Medical Devices*, 2025, 40 (3) : 16-21.
- [6] ZHANG H Y, JIAO L, YANG S X, et al. Brain-computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions[J]. *Int J Surg*, 2024, 110 (9) : 5745-5762.
- [7] 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.
CHEN Q X, LI X. Application status of non-invasive brain-computer interface in stroke hand functional rehabilitation[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2022, 37 (11) : 1566-1571.
- [8] 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.
WANG L P, WANG R X, WEN Y Q, et al. Application of brain-computer interface for the rehabilitation of stroke patients[J]. *Chinese Journal of the Frontiers of Medical Science*, 2025, 17 (2) : 1-7.
- [9] 高楠, 卓晴, 王文渊. 一种新型的人机交互方式——脑机接口[J]. 计算机工程, 2005, 31 (18) : 1-3.
GAO N, ZHUO Q, WANG W Y. A new type of human-computer interface—brain-computer interface[J]. *Computer Engineering*, 2005, 31 (18) : 1-3.
- [10] CAO L F, LI G Y, XU Y, et al. A brain-actuated robotic arm system using non-invasive hybrid brain-computer interface and shared control strategy[J/OL]. *J Neural Eng*, 2021, 18 (4) [2025-07-20]. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/abf8cb>.
- [11] 陈琪, 袁天蔚, 张丽雯, 等. 脑机接口医学应用的研发现状与趋势[J]. 生物医学工程学杂志, 2023, 40 (3) : 566-572.
CHEN Q, YUAN T W, ZHANG L W, et al. The research status and development trends of brain-computer interfaces in medicine[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2023, 40 (3) : 566-572.
- [12] 陈慧婷, 李冰洁, 于海艳, 等. 上肢机器人在脑卒中社区康复中的应用[J]. 上海医药, 2024, 45 (14) : 1-4, 44.
CHEN H T, LI B J, YU H Y, et al. Application of upper limb robots in community rehabilitation of stroke[J]. *Shanghai Medical & Pharmaceutical Journal*, 2024, 45 (14) : 1-4, 44.

- [13] 吴琼, 葛云祥, 马迪, 等. 影响脑卒中患者脑机接口上肢训练效果的相关因素[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27 (3) : 269-276.
WU Q, GE Y X, MA D, et al. Factors related to curative effect of brain-computer interface training on upper limb paralysis after stroke[J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2021, 27 (3) : 269-276.
- [14] MENG L, JIANG X Y, QIN H B, et al. Automatic upper-limb Brunnstrom recovery stage evaluation via daily activity monitoring[J/OL]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2022, 30: 2589-2599[2025-07-20]. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3204781>.
- [15] GANIS G, KIEVIT R A. A new set of three-dimensional shapes for investigating mental rotation processes; validation data and stimulus set[J/OL]. J Open Psychol Data, 2015, 3 (1) : e3[2025-07-20]. <https://doi.org/10.5334/jopd.ai>.
- [16] NANAY B. Mental imagery[EB/OL]. (1997-10-18) [2025-07-20]. <https://plato.stanford.edu/archives/win2021/entries/mental-imagery/>.
- [17] 刘华, 程钰琦, 李洋, 等. 中文版运动觉-视觉想象问卷的结构效度[J]. 中国康复理论与实践, 2017, 23 (5) : 580-583.
LIU H, CHENG Y Q, LI Y, et al. Construct validity of Chinese version of kinesthetic and visual imagery questionnaire[J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2017, 23 (5) : 580-583.
- [18] 刘华, 程钰琦, 李洋, 等. 中文版运动觉-视觉想象问卷在不同年龄、性别正常人群中的信度[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32 (6) : 700-703.
LIU H, CHENG Y Q, LI Y, et al. Reliability of the Chinese version of the kinesthetic and visual imagery questionnaire in normal populations across different ages and genders[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2017, 32 (6) : 700-703.
- [19] MESEGUER-HENAREJOS A B, SÁNCHEZ-MECA J, LÓPEZ-PINA J A, et al. Inter- and intra-rater reliability of the modified Ashworth scale; a systematic review and meta-analysis[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2018, 54 (4) : 576-590.
- [20] GLADSTONE D J, DANELLS C J, BLACK S E. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke; a critical review of its measurement properties[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2002, 16 (3) : 232-240.
- [21] SINGER B, GARCIA-VEGA J. The Fugl-Meyer upper extremity scale[J/OL]. J Physiother, 2017, 63 (1) : 53[2025-07-20]. <https://doi.org/10.1016/j.jphys.2016.08.010>.
- [22] 桑德春, 纪树荣, 张纓, 等. Fugl-Meyer量表在社区脑卒中康复疗效评定中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2007, 22 (3) : 264-265.
SANG D C, JI S R, ZHANG Y, et al. Application of the Fugl-Meyer scale in evaluating the efficacy of community-based stroke rehabilitation[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2007, 22 (3) : 264-265.
- [23] MCDONNELL M. Action research arm test[J/OL]. Aust J Physiother, 2008, 54 (3) : 220[2025-07-20]. [https://doi.org/10.1016/s0004-9514\(08\)70034-5](https://doi.org/10.1016/s0004-9514(08)70034-5).
- [24] PIKE S, LANNIN N A, WALES K, et al. A systematic review of the psychometric properties of the action research arm test in neurorehabilitation[J]. Aust Occup Ther J, 2018, 65 (5) : 449-471.
- [25] 杨宇琦, 山磊, 厉含之, 等. 中文版改良诺丁汉感觉功能评价量表的建立及信效度检验[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36 (11) : 1378-1383.
YANG Y Q, SHAN L, LI H Z, et al. Establishment, validity and reliability of Chinese version revised Nottingham sensory assessment scale[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2021, 36 (11) : 1378-1383.
- [26] LINCOLN N B, JACKSON J M, ADAMS S A. Reliability and revision of the Nottingham sensory assessment for stroke patients[J]. Physiotherapy, 1998, 84 (8) : 358-365.
- [27] WU C Y, CHUANG I C, MA H I, et al. Validity and responsiveness of the revised Nottingham sensation assessment for outcome evaluation in stroke rehabilitation[J/OL]. Am J Occup Ther, 2016, 70 (2) : 7002290040p1-7002290040p8[2025-07-20]. <https://doi.org/10.5014/ajot.2016.018390>.
- [28] 王鹤玮, 贾杰. 心理旋转实验在脑卒中患者运动想象能力评估中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35 (10) : 1260-1263.
WANG H W, JIA J. Application of psychological rotation experiments in the assessment of motor imagery ability in stroke patients[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35 (10) : 1260-1263.
- [29] NASREDDINE Z S, PHILLIPS N A, BÉDIRIAN V, et al. The Montreal cognitive assessment, MoCA; a brief screening tool for mild cognitive impairment[J]. J Am Geriatr Soc, 2005, 53 (4) : 695-699.
- [30] 姜山杉, 邱芷晴, 尤婷婷, 等. 脑卒中后功能障碍基于运动想象脑机接口应用处方研究[J]. 康复学报, 2025, 35 (2) : 212-220.
JIANG S S, QIU Z Q, YOU T T, et al. Research on the application protocol of motor imagery-based brain-computer interface for post-stroke dysfunction[J]. Rehabilitation Medicine, 2025, 35 (2) : 212-220.
- [31] 陆蓉蓉, 高天昊, 胡义茜, 等. 基于运动想象的脑机

- 接口系统联合不同末端效应器对慢性期卒中患者上肢运动功能改善的初步研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39 (8) : 1104-1110.
- LU R R, GAO T H, HU Y Q, et al. Improving upper limb motor function in chronic stroke patients using a brain-computer interface system based on motor imagery combined with different end effectors; a preliminary study[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2024, 39 (8) : 1104-1110.
- [32] TAKEBAYASHI T, TAKAHASHI K, AMANO S, et al. Robot-assisted training as self-training for upper-limb hemiplegia in chronic stroke; a randomized controlled trial[J]. *Stroke*, 2022, 53 (7) : 2182-2191.
- [33] 贾杰. 卒中后手功能康复应评价和治疗并重[J]. *上海医药*, 2014 (2) : 6-8, 9.
- JIA J. Rehabilitation of hand function after stroke requires attention to both assessment and therapy[J]. *Shanghai Medical & Pharmaceutical Journal*, 2014 (2) : 6-8, 9.
- [34] 赵洪圉, 周罗洽非, 胡铃, 等. 卒中中运动功能障碍患者康复管理的最佳证据总结[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2024, 49 (4) : 497-507.
- ZHAO H Y, ZHOU L Z F, HU L, et al. Summary of best evidence for rehabilitation management of patients with motor dysfunction after stroke[J]. *J Cent South Univ (Med Sci)*, 2024, 49 (4) : 497-507.
- [35] 王泽军, 贾杰, 林艳丽, 等. “县域医共体模式”下卒中全周期康复病例分析[J]. *中国卒中杂志*, 2021, 16 (3) : 236-239.
- WANG Z J, JIA J, LIN Y L, et al. A case of stroke rehabilitation under the mode of medical treatment partnerships in county[J]. *Chin J Stroke*, 2021, 16 (3) : 236-239.
- [36] 曹洪涛, 钟子平, 陈远方, 等. 非侵入式脑机接口控制策略的研究进展[J]. *生物医学工程学杂志*, 2022, 39 (5) : 1033-1040.
- CAO H T, ZHONG Z P, CHEN Y F, et al. Research advances in non-invasive brain-computer interface control strategies[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2022, 39 (5) : 1033-1040.
- [37] 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.
- RUAN M H, ZHANG L W, LING J F, et al. Progress on brain computer interface in 2023[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2024, 36 (1) : 39-47.
- [38] 苏美文, 杨文爽, 李博文, 等. 推动人工智能与实体经济深度融合加快发展新质生产力[J]. *工业技术经济*, 2025, 44 (4) : 32-59.
- SU M W, YANG W S, LI B W, et al. Promoting the deep integration of artificial intelligence and real economy and accelerating the development of new quality productivity[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2025, 44 (4) : 32-59.
- [39] 吕晓彤, 丁鹏, 李思语, 等. 脑机接口人因工程及应用: 以人为中心的脑机接口设计和评价方法[J]. *生物医学工程学杂志*, 2021, 38 (2) : 210-223.
- LYU X T, DING P, LI S Y, et al. Human factors engineering of brain-computer interface and its applications; human-centered brain-computer interface design and evaluation methodology[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2021, 38 (2) : 210-223.
- [40] 王海菱, 邵杨鳕. 脑机接口临床应用大有可为[J]. *大数据时代*, 2025 (2) : 12-19.
- WANG H L. SHAO Yangxue: the clinical application of brain-computer interface is promising[J]. *Big Data Time*, 2025 (2) : 12-19.
- [41] 薛夏利, 邓钟义, 孙君志, 等. 康复机器人领域10年研究热点: 基于Web of Science数据库的文献计量学分析[J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26 (14) : 2214-2222.
- XUE X L, DENG Z Y, SUN J Z, et al. Hot spots and frontiers of rehabilitation robot research in recent 10 years: a bibliometric analysis based on the Web of Science database[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2022, 26 (14) : 2214-2222.

收稿日期: 2025-06-08

修回日期: 2025-09-17

本文编辑: 栾璟煜