

引用格式: 王坤, 黄依宁, 刘雨薇, 等. 非侵入式运动想象脑机接口主动运动康复技术发展趋势[J]. 前瞻科技, 2026, 5(1): 36-48; doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.20250056.

WANG Kun, HUANG Yining, LIU Yuwei, et al. Review of active motor rehabilitation techniques with motor imagery based brain-computer interface[J]. Science and Technology Foresight, 2026, 5(1): 36-48; doi: 10.3981/j.issn.2097-0781.20250056.

# 非侵入式运动想象脑机接口主动运动康复技术发展趋势

王坤<sup>1,2</sup>, 黄依宁<sup>1</sup>, 刘雨薇<sup>1</sup>, 王语鹏<sup>1</sup>, 吴鸿儒<sup>1</sup>, 杨欣怡<sup>1</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 许敏鹏<sup>1,2†</sup>

1. 天津大学医学工程与转化医学研究院, 天津 300072

2. 脑机交互与人机共融海河实验室, 天津 300392

**摘要** 脑卒中导致的高致残率已成为我国公共卫生的严峻挑战, 给患者家庭和社会造成了巨大的精神和经济负担。基于头皮脑电的运动想象脑机接口 (MI-BCI) 通过意图驱动的主动康复模式, 在促进神经通路重塑方面展现出巨大潜力。当前, 全球脑科学计划的布局正加速该领域的技术集成与产业转化。文章综述了面向主动运动康复的运动想象脑机接口技术的研究进展与发展现状, 分析了当前面临的问题与挑战, 并对未来发展方向提出了对策建议, 为我国突破脑机接口核心技术壁垒、构建自主可控的主动康复技术体系提供参考与借鉴。

**关键词** 脑机接口; 运动想象; 主动运动康复; 脑电

据国家卫生健康委员会统计, 每年首次脑卒中患者达上千万人, 脑卒中是成年人致死、致残的首要病因, 具有高发病率、高致残率、高死亡率、高复发率和高经济负担等特点<sup>[1]</sup>。在我国存活的脑卒中患者中, 约 62% 遗留有不同程度的残疾<sup>[2]</sup>。脑卒中后遗症, 如瘫痪等运动障碍, 会使患者的生活质量和社会参与能力受到严重影响<sup>[3]</sup>, 给患者家庭和社会造成了巨大的精神和经济负担。传统的被动式康复训练方法, 如针灸、协助强迫运动, 主要帮助患者活动肢体, 目的是防止患肢出现肌肉萎缩<sup>[4]</sup>。然而, 上述方法主要依赖被动肌肉康复, 忽

略了中枢神经系统在运动神经环路康复中的作用, 核心局限在于: 缺乏对运动皮层的主动激活, 难以建立意图驱动的神经重塑过程, 从而限制了运动功能恢复的效果。

脑机接口 (BCI) 在人脑与外部设备间建立一条直接的信息交流通路, 通过检测中枢神经系统活动并将其转化为人工输出来替代、增强、重建、补充或改善中枢神经活动系统<sup>[5]</sup>。脑电图 (EEG) 能够采集中枢神经系统的神经生理信号, 通常被用作 BCI 的控制信号。根据脑电信号采集方式, BCI 可分为侵入式和非侵入式。侵入式 BCI 将采集电

收稿日期: 2025-12-23; 修回日期: 2026-03-17

资助项目: 国家自然科学基金 (82330064, 62206198)

†通信作者

极通过神经外科手术植入颅骨下，能够获得更高信噪比和高空间分辨率的脑电信号；但电极的长期植入可能引起人体免疫反应，炎症细胞包裹电极形成瘢痕组织，使电极失去信号采集功能。此外，由于侵入式 BCI 位置固定，需创伤植入，技术难度大，存在感染风险，适用人群范围较小<sup>[6]</sup>。非侵入式 BCI 则采集头皮表面的脑电信号，较为安全简单，且时间分辨率高；但头皮表面的脑电信号空间分辨率较低，受容积导体效应影响，信噪比较低。非侵入式 BCI 因具有安全、便携、廉价和技术成熟等特点而被广泛应用。

运动想象 (MI) 作为一种主动式脑机接口范式，无需外界刺激即可实现“意图驱动”的交互，在卒中后运动功能康复中展现出巨大潜力。相比传统手段，运动想象脑机接口 (MI-BCI) 结合功能性电刺激 (FES) 建立的“中枢-外周”闭环反馈机制，能更有效地激活神经可塑性并促进受损通路重塑<sup>[7]</sup>。尽管全球科研与产业布局正加速推进，但头皮脑电信号稳定性、解码精度及临床转化效率仍是制约其大规模应用的关键瓶颈。鉴于此，文章系统综述基于头皮脑电的 MI-BCI 在主动康复领域的研究现状与技术瓶颈，旨在为突破现有挑战、推动我国脑机接口产业化落地提供建议参考。

## 1 国外发展现状

### 1.1 发展布局

自脑机接口概念被提出以来，特别是进入 21 世纪以来，许多国家纷纷提出脑计划布局 BCI 发展，不断加大对 BCI 的研究力度，产生了一系列具有代表性的理论和应用成果。其中，基于 BCI 的主动运动康复应用前景广阔，在临床试验中得到广泛应用与验证。

2013 年，美国正式启动脑计划<sup>[8]</sup>，旨在探索人脑工作机制。2018 年，美国国立卫生研究院对超 200 个新项目投资超 4 亿美元，其中包含多项“无创脑机接口”相关项目。美国国防高级研究计划局 (DARPA) 布局了多项脑科学前沿研究，深挖脑

机接口的医疗和军事价值。DARPA 资助的脑机接口研究多用来恢复脑损伤后的神经功能和行为功能。其中，“革命性假肢”计划开发拟人化机械臂和控制系统，为患者拓展假肢选择范围；“定向神经可塑性训练”项目研发激活突触可塑性的神经刺激方法，为主动运动康复提供方法支撑；“缩小差距”项目研制新型智能和自适应神经接口，为脊髓损伤患者的自然功能恢复提供帮助。美国脑计划 2.0 中“基于神经回路的疗法”项目通过高时空精度干预特定神经回路，可以实现大脑功能的长期改变。

2013 年，由欧洲联盟委员会资助的人类脑计划 (HBP)<sup>[9]</sup> 启动。虽然 HBP 不直接涉及与脑机接口主动康复相关的研究，但是其中的大脑仿真平台、高性能计算平台、神经拟态计算平台、神经机器人平台等六大计算平台为未来脑机接口的发展和应用提供平台支撑。大脑仿真平台和神经拟态计算平台可以帮助理解神经可塑性机制，为主动康复提供理论支撑；神经机器人平台开发的相关技术可以为主动康复设备提供技术支持。

日本脑计划<sup>[10]</sup> 主要通过研究灵长类动物猕猴来弥补鼠类在研究人类大脑疾病方面的缺陷，在研究中收集的关于神经疾病和脑血管疾病等的大脑成像信息可用于构建人类疾病模型，更全面的神经机制认知可为主动康复提供更高层次的逻辑和理论支撑。2016 年，韩国政府正式公布了韩国脑计划 (KBI)<sup>[11]</sup>，KBI 主要瞄准包括阿尔兹海默症和帕金森病在内的神经退行型疾病，通过神经技术创新、个性化药物开发探究神经类疾病机制和治疗方法，与脑机接口在医疗领域的研究应用具有高度的重合性。2016 年，澳大利亚科学院发起澳大利亚脑计划 (ABI)<sup>[12]</sup>，ABI 通过揭示神经回路发展、编码和检索信息的机制，旨在破解大脑的密码。为揭开大脑的奥秘，ABI 通过开发神经接口以记录和控制大脑活动，从而实现大脑相关功能的主动康复。

### 1.2 主要研究团队

自 1924 年德国 Berger 首次发现脑电波以来，

脑机接口技术研究逐步由基础神经信号研究发展为面向临床康复的人机交互系统。近年来，世界各国陆续有研究团队致力于研究非侵入式 MI-BCI 在主动运动康复领域的应用，其技术演进可概括为 3 个发展阶段：高精度解码阶段、连续控制验证阶段和临床闭环康复阶段。

在高精度解码阶段，重点研究如何提升脑电信号特征提取与分类的准确率。以奥地利格拉茨理工大学团队为代表，其提出的基于共同空间模式和自适应滤波的运动想象分类框架，在标准 BCI Competition 数据集上实现了 80% 以上的分类准确率，奠定了 MI-BCI 信号处理的经典算法体系<sup>[13]</sup>。此阶段的技术特征是离线分析精度持续提高，分类算法由简单判别模型逐步发展到深度学习模型，典型在线系统的信息传输率一般介于 10~25 bit/min，但系统多停留在实验室环境验证层面。

在连续控制验证阶段，美国卡耐基梅隆大学分别于 2013 年和 2019 年实现了运动想象控制无人机越障飞行和机械臂连续轨迹追踪，验证了非侵入式 BCI 在二维和三维连续控制任务中的可行性<sup>[14-15]</sup>。相比离散分类控制，连续轨迹解码对信号稳定性和实时性提出更高要求，展示了 MI-BCI 从分类识别向动态控制过渡的关键进展。

在临床闭环康复阶段，美国休斯顿大学开发的脑机头环将 MI-BCI 与机械臂或外骨骼系统结合<sup>[16]</sup>；澳大利亚阿德莱德大学提出的 RehabSwift 疗法，该疗法根据患者的个人神经认知特征对其通过运动想象控制外骨骼的过程进行个性化定制，构建运动意图识别-执行反馈-神经可塑性调节的闭环康复模式，经数周训练后卒中患者手部运动能力显著改善<sup>[17]</sup>。新加坡南洋理工大学进一步将 MI-BCI 与经颅直流电刺激结合，探索神经调控与运动想象训练的协同机制，体现出多模态神经调控型 BCI 的发展趋势<sup>[18]</sup>。

在科研探索与技术发展的同时，部分非侵入式 MI-BCI 技术开始迈向监管审批与产品化阶段，标志着该领域由科研探索向医疗器械转化的重要过渡。2021 年，Neuroolutions 公司开发的 Ipsihand 系

统获得美国食品药品监督管理局批准上市<sup>[19]</sup>。该系统由脑电帽和上肢机械外骨骼组成，通过解码患者运动想象信号驱动患侧手完成张开与回握动作，形成运动意图-执行反馈的功能性闭环训练模式。其获批不仅验证了非侵入式 MI-BCI 在安全性和临床可行性方面达到一定标准，也表明主动意图驱动型神经康复系统具备产业化和规范化应用的潜力。

在非侵入式 BCI 在主动运动康复领域广泛开展研究并逐步推进临床验证的同时，国外侵入式 BCI 技术在高分辨率神经信号采集和高带宽解码能力方面展现出更高的性能上限，成为当前神经工程领域突破性研究的重要方向。以美国斯坦福大学为代表的皮层微电极阵列研究显示，通过植入运动皮层电极并结合递归神经网络解码算法，可实现手写动作的实时神经解码，瘫痪患者文本输入速度达 90 字符/min，准确率高达 94.1%，相关成果于 2021 年发表在 *Nature* 上，体现了侵入式系统在高时空分辨率和高信息传输率方面的显著优势<sup>[20]</sup>。企业层面，以 Neuralink 公司为例，其开发的高通道数柔性电极系统 Telepathy 于 2024 年启动人体临床试验，使四肢瘫痪患者能够通过意念实现鼠标移动与文字输入，标志着高通量无线化侵入式 BCI 正式进入早期临床阶段<sup>[21]</sup>；2025 年，进一步扩大临床项目规模，在脊髓损伤患者中验证了系统的初步安全性与可行性，探索脑控辅助机器人等功能应用<sup>[22]</sup>；同时，宣布计划于 2026 年推进设备规模化生产及自动化植入手术流程，以降低临床应用门槛。总体来看，Neuralink 公司的技术路线强调高带宽、无线化和长期稳定植入，代表了侵入式系统向规模化和工程化发展的趋势。然而，目前该技术仍处于早期临床验证阶段，长期安全性、广泛适用性和手术风险等问题尚待更多循证研究和监管评估。

综上所述，多国政府、科研院所和企业正在持续推动脑机接口技术在主动运动康复领域的研究和临床转化应用，加大资金支持和研究力度，且在侵入式 BCI 领域的关键技术研发和临床探索方面处于国际前沿水平。未来，该技术可能以 EEG-FES 一体化康复设备、脑控康复机器人和便携式家

庭康复系统等形式应用于临床，用于在患者缺乏自主运动能力阶段提供意图驱动的神经康复训练。同时，降低设备复杂度、提高信号识别稳定性和建立标准化临床应用流程，将是推动脑机接口从实验室走向常规康复手段的关键方向。

## 2 我国发展状况

### 2.1 发展布局

在世界各国加速推动脑科学研究的背景下，我国也在稳步推进脑科学与类脑研究的发展布局。我国脑计划——脑科学与类脑科学研究于2016年启动，分为以探索大脑秘密并攻克大脑疾病为导向的脑科学研究和以建立并发展人工智能技术为导向的类脑研究两个方向。2017年提出“一体两翼”发展布局，即以研究脑认知的神经原理为“主体”，以绘制脑功能联结图谱为重点，研发脑重大疾病诊治新手段和脑机智能新技术为“两翼”。其中，脑机接口技术不仅是混合脑机智能的新技术，也可能是脑重大疾病诊治的新手段，具有重大应用前景。

当前，国家高度重视脑机接口产业发展，出台一系列支持政策。近年来，国家部委和地方密集释放政策信号，指明发展重点和方向，将脑机接口纳入未来产业，加速推进脑机接口产业发展。2024年，工业和信息化部等7部门发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》，重点推进含未来健康在内的6个前瞻部署新赛道，推动人工智能等技术赋能医疗，研发脑机交互等先进技术的高端医疗装备；打造十大标志性产品，突破脑机融合、大脑计算神经模型等关键技术和核心器件，研制一批易用安全的脑机接口产品，鼓励探索在医疗康复等典型领域的应用。2025年，工业和信息化部等7部门再次发布《关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见》，强化脑机接口基础软硬件攻关，推动产品迭代升级，拓展应用场景并完善产业支撑体系。除此之外，2025年以来，国家医疗保障局、国家药品监督管理局等部门也出台了配套措施，推动脑机接口技术的应用落地：国家医疗保障局将脑机接口技

术纳入新增医疗价格项目，明确收费标准；国家药品监督管理局发布《采用脑机接口技术的医疗器械术语》行业标准，统一行业语言，加速创新转化，并奠定监管基石，引领产业规范发展。2026年，在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》中，脑机接口被纳入前瞻布局的六大未来产业，正成为新的经济增长点；“脑机接口”首次被正式写入政府工作报告，并被明确列为培育发展的未来产业之一。上述政策引航脑机接口产业整体发展，并通过医保支付突破、标准体系构建、临床应用试点三大抓手，直接降低患者负担、创新医院诊疗方式、明确企业研发路径，最终推动脑机接口从实验室走向产业化、规模化应用。

2018年，美国商务部工业和安全局已将脑机接口作为第一级目录列入《出口管制清单》，限制对我国的技术输出；2021年，又进一步发布了《关于拟制定脑机接口技术出口管制规则的通知》。2022年，美国国会下属机构政府问责局发布了题为 *Brain-Computer Interfaces* 的焦点报告，指出要限制其他国家利用美国出口的脑机接口技术获得相关竞争优势；并通过解雇脑机接口相关领域华裔科学家，禁止我国高新科技企业并购其他海外高新科技企业，以限制签证发放等手段围追堵截我国高学历人才进入美国学习或开展国际学术交流，阻止高端人才流动。因此，我国脑机接口产业化发展正面临前所未有的战略威胁、技术封锁与人才封锁。

### 2.2 主要研究团队及典型案例

我国基于MI-BCI主动康复的研究虽然起步较晚，但发展迅猛。2017年，成立中国生物医学工程学会下领导的“脑机接口学组”。我国高校在脑机交互技术研发方面非常踊跃，天津大学、清华大学、浙江大学、西安交通大学、国防科技大学、电子科技大学、华东理工大学等高校都已设立相关研究课题组。

在高精度解码与核心器件研发方面，天津大学和中国电子信息产业集团有限公司<sup>[23]</sup>在2019年联合研发了全球首款脑机接口专用芯片，可助力脑电信号的采集和编解码，促进脑电采集设备的微型化

与便携化。上海大学 Chang 等<sup>[24]</sup>提出时空特征增强网络解码运动想象脑电信号，在 4 个公开数据集展现出良好的解码性能。

在控制验证与多模态系统集成方面，华南理工大学 Huang 等<sup>[25]</sup>研发的多模态无创脑机接口系统，可基于脑控实现轮椅、家居和车辆控制等，提升患者生活质量；上海大学 Wang 等<sup>[26]</sup>结合虚拟现实技术改善脑卒中患者肢体运动功能障碍；西安交通大学 Zhao 等<sup>[27]</sup>重点研究中风康复的脑机主被动协同康复机制和脑控中风康复机器人；华东理工大学 Miao 等<sup>[28]</sup>针对脑卒中、肌萎缩侧索硬化病人开发脑机接口系统辅助康复训练；齐鲁工业大学 Xu 等<sup>[29]</sup>针对脊髓损伤和脑卒中患者，开发多特征信息融合脑控外骨骼机器人，助力患者的主动运动康复。

在临床闭环康复与规模化验证方面，构建运动意图识别-执行反馈-神经可塑性调节的完整康复体系。电子科技大学提出面向不同脑卒中患者的个性化脑机接口，结合下肢康复外骨骼机器人，搭建基于脑肌电的多模态外骨骼神经控制平台，并在脑卒中患者上验证其有效性，实现运动-认知闭环康复训练。天津大学自主研发的全球首台人工神经康复机器人系统“神工”系列（图 1）<sup>[30]</sup>，通过捕捉头皮微弱的脑电波信号，结合多级神经肌肉电刺激技术和机械外骨骼技术，帮助中风患者恢复运动能力。“神工”系列康复机器人系统在多地三甲医院开展临床实验 3 000 余例，其中部分产品已获得医疗器械注册证。

我国侵入式脑机接口研究起步较晚，且受制于手术风险、伦理监管和临床资源条件，能够开展人体植入研究的团队数量相对有限。近年来，少数高校与医院联合团队已在该领域实现关键突破。浙江大学<sup>[31]</sup>较早开展临床探索，2020 年在国内首次在高龄高位截瘫患者颅内植入电极，实现意念控制机械臂，可进行复杂运动控制（图 2），是国内首个应用植入式脑机接口结合外部设备辅助患者进行主动运动康复的临床研究。

2024 年，清华大学与首都医科大学宣武医院<sup>[32]</sup>

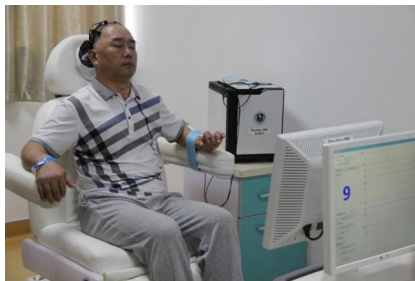


图 1 天津大学“神工”系列主动运动康复机器人  
(来源：天津大学新闻网)

Fig. 1 Artificial neural rehabilitation robots of Tianjin University “ShenGong” series  
(Source: Tianjin University News)



图 2 浙江大学植入式脑机接口  
(来源：浙江大学求是新闻网)

Fig. 2 Implantable BCI developed by Zhejiang University  
(Source: Zhejiang University News)

合作开展无线微创脑机接口临床试验，采用硬膜外感觉运动区信号采集方案，实现体内设备的无线供电与通信，提升系统长期使用的安全性和舒适性。经过 3 个月居家训练，患者可通过脑控气动手套完成抓握动作，并实现光标自由移动（图 3）。与早期有线植入系统相比，该技术路线更强调微创化、无线化和长期稳定植入，代表了我国侵入式脑机接口向工程化与可持续临床应用发展的趋势。2025 年，北京脑科学与类脑研究所和北京芯智达神经技术有限公司<sup>[33]</sup>合作研制的“北脑一号”智能脑机系统已完成国际首批柔性高通量半侵入式无线全植入脑机系统的人体植入，进入临床验证阶段，目前已完成 5 例患者植入，为国内规模化临床验证提供了重要探索方向。国内侵入式脑机接口虽起步较晚、团队数量有限，但已形成多线并进的技术布局，以及由单例临床验证向系统优化和长期应用过渡的发展态势。



图3 清华大学无线微创脑机接口（来源：清华新闻网）  
Fig. 3 Wireless minimally invasive BCI developed by Tsinghua University (Source: Tsinghua University News)

企业方面，浙江强脑科技有限公司（BrainCo）开发的非侵入式脑机接口产品已实现产业化，其研发的智能仿生手通过采集残肢末端的表面肌电信号，让残障人士实现意随心动的精细抓握；针对教育和康复领域，通过头皮脑电神经反馈技术辅助学生提升注意力，或帮助成人改善睡眠质量。BrainCo作为国内脑机接口领域的首个独角兽企业，通过持续研发与大规模融资，推动非侵入式BCI技术从实验室转向市场化产品，为国内脑机接口技术的产业应用提供了典型案例。

尽管当前国内外MI-BCI技术已能实现运动意图识别并驱动外骨骼、电刺激等设备，初步形成主动康复闭环，但多数系统仍处于临床试验或早期产品阶段。侵入式脑机接口虽在信号质量和带宽方面具有优势，但由于手术风险、伦理审查严格和适用人群局限，主要面向重度神经损伤患者，临床推广范围严重受限。相比之下，非侵入式MI-BCI安全性高、可重复使用和易于推广，被视为主动运动康复的主要技术路径。然而，当前非侵入式系统仍面临脑电信号信噪比低、跨个体差异显著、解码稳定性不足、设备佩戴与操作流程复杂、易用性差，以及缺乏统一技术标准和临床评价体系等问题，要实现广泛临床应用，仍需在稳定性、易用性和标准化等方面实现系统性突破。

### 3 问题与挑战

近年来，我国脑机接口技术在主动运动康复领域发展迅猛，论文发表和专利申请数量呈增长趋

势，这表明该技术正处于从理论探索走向成熟实践的发展阶段。前沿技术发展促进技术转化落地，进一步激发产业界创新活力，推动行业发展。然而，尽管MI-BCI已初步建立主动康复闭环，但在运动相关神经机制阐释、稳定高质量脑信号采集、运动意图精准解码、个体化康复适配与临床转化等多个环节仍存在关键瓶颈，限制了其规模化临床应用。

在产业发展方面，当下脑机产业尚未成体系，针对主动康复的运动想象脑机接口应用场景仍较为局限。随着技术愈发成熟和资本的持续入场，有望推动脑机接口技术在康复医疗等领域的深度结合。同时，在产业应用方面，中短期内脑机接口仍会将重点应用于医疗领域，帮助卒中患者修复运动功能和感知功能，助力瘫痪、渐冻症患者等恢复独立生活和社交能力，满足医疗需求；长期来看，脑机接口将与机器人、元宇宙等相结合，进一步拓展主动运动康复的应用场景，提高应用效果。当前我国要形成脑机产业规模化发展，尚存在以下关键问题亟待解决。

#### 3.1 关键技术瓶颈亟待突破

脑机接口技术在医疗领域彰显出卓越的研究价值与广泛的应用前景。然而，无论是侵入式还是非侵入式技术，均亟需在神经科学原理、高端硬件设备和高效数据处理算法等多个核心技术领域实现关键性突破，以推动主动康复的发展需求，进而实现更精准、高效的康复治疗效果。

（1）在神经科学原理方面，目前对主动运动康复相关的运动神经机制的理解仍有限。脑科学发展是脑机接口技术发展的核心加速器，理解大脑主动运动康复依赖的神经通路机制是促进脑机接口技术应用于主动运动康复的根基，脑机接口技术应用为理解神经科学原理提供新的角度和方法，脑机接口技术发展与脑科学研究相互促进，形成良性循环。尽管神经科学研究在大脑结构和基础功能方面取得了显著进展，但针对主动运动康复依赖的中枢神经系统如何驱动、调控和重塑受损神经通路的深层机制，现有认知尚不充分<sup>[34]</sup>。例如，现有研究关于中枢神经系统如何感知并响应运动意图的精细过

程较为模糊；对受损神经通路如何在外界干预下实现重塑的过程尚不清楚；神经重塑过程的具体分子机制、信号传导路径等仍是目前研究的热点和难点。此外，不同个体在康复过程中的恢复程度存在显著差异。一方面，现有研究对主动运动康复过程中的个体差异性知之甚少，其神经基础和影响因素，如运动皮层损伤严重程度、脑功能状态和个体运动想象能力（如存在部分“BCI盲”难以产生有效的运动意图脑电信号）等尚未得到系统阐明；另一方面，部分患者群体不适用于MI-BCI主动运动康复，如严重认知障碍患者难以理解实验任务，有癫痫发作病史患者可能异常放电影响实验任务等，导致该技术的应用效果可能有限。未来仍需进一步研究导致个体差异的神经原理，以揭示不同个体在康复过程中的特异性机制和需求。

需要指出的是，MI-BCI在康复过程中具有辅助性和阶段性特征。MI-BCI的作用是通过重复激活运动相关脑区促进神经功能重组，而非直接修复受损神经结构，其康复效果通常需要长期训练才能显现，且恢复程度受损伤部位和严重程度影响较大，有约10%的患者在经过训练后难以达到康复效果<sup>[35]</sup>。因此，MI-BCI更适用于在主动运动能力缺失或较弱阶段，有助于维持和激活运动相关脑网络。然而，随着实际运动能力恢复，基于真实运动执行的任务导向训练仍是更直接有效的康复手段。因此，MI-BCI更适合作为综合康复体系中的辅助方法，其临床价值在于为神经功能恢复提供支持条件，而非替代传统运动康复训练。

(2) 在硬件设备方面，仍需对电极、放大器等设备进行优化以满足主动运动康复需要。对于非侵入式电极，提升用户体验和操作便捷性成为优化的重点。传统湿电极准备工作烦琐、舒适度较低且依赖导电膏，使其在家庭康复或日常训练中的普及受限；现有干电极采集到的脑电信号不稳定，且佩戴体验感较差。因此，研发新型非侵入式电极，如干电极、梳状电极或柔性电极，以提升佩戴舒适度、简化操作流程、缩短准备时间，实现长期、稳定的脑电信号采集，是推动主动康复普及化的重要

方向；除此之外，现有高精度、多导联脑电采集设备体积庞大、不便携带，开发便携化、高性能的脑电采集系统成为当务之急<sup>[36]</sup>。

(3) 在范式设计与数据处理方面，当前运动想象范式简单，可输出指令少，这些问题直接关系到康复效果的精准度和效率。针对范式问题，现有技术无法区分精细运动动作<sup>[37]</sup>，对复合动作识别也有限<sup>[38]</sup>。针对解码模型，由于脑电数据深受个体差异影响，且在实际康复训练过程中往往要求即时反馈，对解码算法的实时性、鲁棒性和模型泛化能力<sup>[39]</sup>提出了极高要求。因此，开发能够适应个体差异、高效解析复杂神经信号、可在短时间内准确反馈的解码算法和模型，是推动主动康复技术突破的关键；同时，数据标准化问题仍制约着脑机接口技术的普及与应用。当前领域内缺乏统一的数据标准，不同厂商、不同设备采集的数据格式、参数设置难以互通，严重阻碍数据共享与整合<sup>[40]</sup>。这不仅增加了科研人员处理数据的难度与成本，也限制了先进算法和模型在不同系统间的迁移与应用，削弱了脑机接口技术在主动康复中的整体效能。

### 3.2 成果转化与产品落地慢

面向主动运动康复的脑机接口虽已积累了丰硕的理论基础与技术成果，但其产品的实际落地应用却步伐缓慢，仍面临研发周期长、审批流程复杂、个体差异大等多重挑战。在临床验证过程中，寻找并招募符合条件且愿意参与的受试者往往较为困难，同时严格的伦理审批流程也可能延长整体研发周期。在设备审批方面，涉及安全性和有效性验证等多个环节，这对研发团队的时间和资源的投入提出了更高的要求。除此之外，制约临床应用的关键因素还在于该技术存在较明显的个体差异性，导致系统并非对所有患者均有效，限制了其作为标准化医疗产品的普适性。

### 3.3 复合型人才紧缺

脑机接口技术在主动运动康复领域的迅猛发展与产学研用深度融合的加速，愈发凸显了人才培养作为核心驱动力的关键作用。这一领域不仅要求专

业人才具备深厚的神经科学、计算机科学和生物医学工程等多学科背景，更强调跨学科融合和创新能力，以应对主动康复过程中复杂多变的挑战。除此之外，美国对我国脑机接口领域的人才出口限制日趋严重，我国正面临前所未有的战略威胁和人才封锁。

(1) 跨学科协同培养机制亟需深化。脑机接口技术具有深度交叉性，需要配套完善的跨学科协同培养体系。尽管当前已有初步尝试，但多学科间的人才交流和融合仍显不足，培养出的专业人才难以全面覆盖技术链条的各个环节。

(2) 综合型研究团队建设亟待加强。面对主动康复领域的迫切需求，我国脑机接口研究团队普遍存在的“孤岛现象”，这成为制约发展的瓶颈。各团队往往专注于自身细分领域，缺乏跨领域合作的广度与深度，难以形成解决全链条科学问题的合力。

### 3.4 数据安全与伦理问题

在主动运动康复的临床应用中，脑机接口技术面临着严峻的数据隐私和伦理挑战。脑电信号作为高度敏感的个体生物特征，承载着用户的运动意图和潜在的认知状态，其在采集、无线传输和云端存储过程中存在隐私泄露与非法篡改风险，如何构建稳健的数据加密体系并确立脑隐私权属是当前的技术难题<sup>[41-42]</sup>。康复过程涉及“意图驱动”的闭环反馈，一旦算法解码失误或受到外部恶意干扰，可能诱发功能性电刺激或康复机器人产生错误动作，从而对受试者造成不可逆的物理损伤。此外，基于算法生成的运动反馈引发了关于康复主体自主性和法律责任归属等深层伦理争议。这些数据安全风险与伦理不确定性，不仅增加了临床系统的复杂性，也成为制约 MI-BCI 技术在主动康复领域大规模推广的关键制度性屏障<sup>[43]</sup>。

## 4 对策建议

### 4.1 攻克核心技术瓶颈

(1) 深化意图驱动下的神经重塑机制研究。

针对主动康复需求，应重点解析“脑-机-体”闭环交互下的神经可塑性规律。重点探究在大脑运动想象与外周物理反馈同步耦合时基于神经电生理指标的康复量化评估模型，为制定精准化、个体化的主动康复方案提供底层理论支持，从源头上解决个体差异导致的技术适配难题。

(2) 研发面向康复现场的高鲁棒性采集硬件。硬件研发应突破实验室环境限制，聚焦于非侵入式脑信号在复杂临床或居家康复场景下的稳定性瓶颈。重点攻克兼顾高导电性能与长时间佩戴舒适度的柔性电极技术，并提升信号采集设备的抗干扰能力和便携性。通过降低运动伪迹干扰，确保患者在进行主动运动训练时，系统能够实时、稳定地捕获高质量的原始脑电数据。

(3) 突破精细运动意图解码与跨个体泛化算法。算法开发应从简单的离散动作识别转向复杂、多自由度的精细运动意图解码，以满足精细功能康复的需要。针对患者信号特征微弱且非平稳的痛点，需设计具备高准确率和快速响应能力的解码框架。同时，利用迁移学习等技术增强算法的跨个体泛化能力，有效缩短新用户的系统校准时间，降低临床应用门槛，实现脑机接口系统在不同患者间的快速适配。

### 4.2 加速成果转化落地

脑机接口作为培育经济发展新动能的未来产业，其从实验室走向市场的关键在于打通准入、评价与应用的链条。建议从以下 3 个维度加速成果转化。

(1) 完善监管体系与行业标准规范。针对脑机接口康复医疗器械的特殊性，建议建立审评审批“绿色通道”，出台专项技术审评指南以缩短创新产品的上市周期。同时，加快制定关于数据接口、生物安全性评价和临床有效性验证的行业标准，解决目前不同品牌设备间兼容性差、临床准入门槛模糊等问题，为规范化大规模应用奠定制度基础。

(2) 构建产医深度融合的转化平台。建立以临床需求为导向的“医院-高校-企业”协同机制，鼓励建设综合性脑机接口临床转化中心。通过设立专项转化基金，支持科研团队与康复医疗机构

共建临床试验基地，在真实应用场景中对原型机进行迭代优化。这种产医融合模式能够有效打通从工程样机到成熟医疗产品的“最后一公里”，确保技术创新与临床实际需求精准对接。

(3) 探索多元化的市场激励和医保支付机制。强化国产核心部件的自主供给能力，通过规模化生产降低设备成本，提升国产设备在全球市场的竞争力。积极探索将符合条件的脑机接口主动康复训练纳入医保支付试点或长期护理保险体系，降低患者使用门槛。通过扩大临床应用覆盖面产生实际市场收益，反哺科研投入，形成“研发-应用-收益-再研发”的良性循环创新生态。

### 4.3 强化复合型人才培养

国内在脑机接口领域的复合型人才相对稀缺，跨学科科研产业人才瓶颈难突破。因此，加强人才培养体系的建设、打破学科之间的壁垒、促进多学科交叉合作对脑机接口在主动运动康复领域的发展，对摆脱西方的技术和人才封锁至关重要。

(1) 构建以脑机接口为核心的专业化人才培养体系，培养具备多学科背景的创新型人才。2024年，天津大学秉持前沿教育、产学研结合理念，在未来技术学院开设生物医学工程脑机接口方向；2025年，天津大学自主审核新增脑机接口一级学科博士学位授予点通过专家组论证，标志着天津大学在脑机接口高层次人才培养体系建设方面迈上新台阶，此举是探索培养具备卓越创新能力和实践能力的复合型拔尖创新人才的积极尝试。建议参考天津大学的经验，鼓励有条件的高校增设脑机接口相关专业。通过编写针对主动康复场景的专项教材，建立涵盖神经信息学、临床康复学和数字信号处理的跨学科课程标准，实现从本科到博士的高层次人才培养路径常态化，从根本上缓解脑机接口领域的专业人才稀缺现状。

(2) 组建产学研用协同的“实训一体化”创新联盟。建议由行业领军企业联合顶尖实验室，共同打造脑机接口工程化人才梯队。通过定期举办具有临床针对性的脑机接口算法挑战赛及应用开发营，构建跨区域的学术共同体。同时，建立“企业

设题、高校揭榜、临床验证”的协同培养基地，为人才提供真实的软硬件开发与患者测试环境。通过政产学研用协同方阵，加速人才在关键技术攻关与产业化实战中的成长。

### 4.4 完善伦理与安全监管体系

针对伦理问题，建议积极开展技术发展与伦理道德冲突的广泛探讨，让技术在合乎道德规范的法律框架内发展，在应用落地之前形成规范。保护个人和敏感隐私信息，避免引起恐慌和舆论风险，加强伦理教育和宣传。同时，政府和相关行业组织加强监管，提供政策指引，建立统一的评价标准体系，重视管控制度的建立与完善，尽早组织开展恶意侵入检测技术的研究并确定相应的保护机制，从而保障脑机接口技术在研发、使用和普及过程中的各重要环节，促进脑机接口的安全应用。

## 5 结束语

运动想象脑机接口通过识别患者的运动意图并与功能性电刺激、康复机器人等设备结合，可在无实际运动或运动能力受限情况下激活运动相关脑网络，构建运动意图-神经激活-感觉反馈的闭环调控机制，为卒中等神经损伤患者提供了一种主动参与的运动功能康复训练方式。近年来，随着脑科学研究深入、信号采集设备小型化和智能解码算法的发展，MI-BCI在实验研究和初步临床应用中已显示出促进运动功能恢复的潜力，部分系统已进入产品化和临床试点阶段。然而，该技术仍面临神经机制认知不足、信号稳定性有限、个体差异显著和临床应用流程尚未标准化等问题，且其康复效果具有辅助性和阶段性特征，尚难替代传统运动康复训练。未来，随着脑科学基础研究突破、多模态融合技术发展及医疗器械的进一步规范化推进，非侵入式MI-BCI有望逐步形成与康复机器人、电刺激和家庭康复系统融合的综合解决方案，推动主动运动康复由被动训练向意图驱动的神功能重建模式转变，为神经功能障碍患者提供更加精准和个体化的康复手段。

## 参考文献

- [1] 《中国脑卒中防治报告 2021》编写组. 《中国脑卒中防治报告 2021》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 20(11): 783-793.  
Writing Group of Report on Prevention and Treatment of Stroke in China 2021. Summary of report on prevention and treatment of stroke in China 2021[J]. Chinese Journal of Cerebrovascular Diseases, 2023, 20(11): 783-793. (in Chinese)
- [2] 刘凤, 刘亚兰, 陈泽, 等. 运动想象疗法在脑卒中后功能康复中的研究进展[J]. 临床医学研究与实践, 2022, 7(15): 194-198.  
Liu F, Liu Y L, Chen Z, et al. Research progress of motor imagery therapy on functional rehabilitation after stroke[J]. Clinical Research and Practice, 2022, 7(15): 194-198. (in Chinese)
- [3] 曾将荣. 脑卒中偏瘫患者康复护理介入时机的研究进展[J]. 实用临床护理学电子杂志, 2018, 3(6): 185.  
Zeng J R. Research progress on timing of rehabilitation nursing intervention in stroke hemiplegic patients[J]. Electronic Journal of Practical Clinical Nursing Science, 2018, 3(6): 185. (in Chinese)
- [4] 杨帮华, 马骏, 邱文政. 面向脑卒中疾病的运动想象脑机接口技术[J]. 人工智能, 2021(6): 70-78.  
Yang B H, Ma J, Qiu W Z. Brain-computer interface technology of motor imagination for stroke diseases[J]. AI-View, 2021(6): 70-78. (in Chinese)
- [5] Wolpaw J R, Birbaumer N, McFarland D J, et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. Clinical Neurophysiology, 2002, 113(6): 767-791.
- [6] 王坤. 脑-机接口中运动意图诱发脑电响应的关键特征强化与识别[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
Wang K. Enhancement and recognition of electroencephalography features induced by movement intention for brain-computer interfaces[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [7] Wang Z P, Zhou Y J, Chen L, et al. BCI monitor enhances electroencephalographic and cerebral hemodynamic activations during motor training[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2019, 27(4): 780-787.
- [8] Bargmann C I, Newsome W T. The brain research through advancing innovative neurotechnologies (BRAIN) initiative and neurology[J]. JAMA Neurology, 2014, 71(6): 675.
- [9] Mahfoud T. Extending the mind: A review of ethnographies of neuroscience practice[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2014, 8: 359.
- [10] Okabe S. Brain/MINDS—A new program for comprehensive analyses of the brain[J]. Microscopy, 2015, 64(1): 3-4.
- [11] Jeong S J, Lee I Y, Jun B O, et al. Korea brain initiative: Emerging issues and institutionalization of neuroethics[J]. Neuron, 2019, 101(3): 390-393.
- [12] Richards L R, Michie P T, Badcock D R, et al. Australian brain alliance[J]. Neuron, 2016, 92(3): 597-600.
- [13] Ramoser H, Muller-gerking J, Pfurtscheller G. Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand movement[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 2000, 8(4): 441-446.
- [14] LaFleur K, Cassady K, Doud A, et al. Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface[J]. Journal of Neural Engineering, 2013, 10(4): 046003.
- [15] Suma D, Meng J J, Edelman B J, et al. Spatial-temporal aspects of continuous EEG-based neurobotic control[J]. Journal of Neural Engineering, 2020, 17(6): 066006.
- [16] ONWARD announces first-in-human implant of ARC-IMTM stimulator with Brain-Computer Interface (BCI) to restore arm, hand, and finger function after spinal cord injury-bioSpace[EB/OL]. [2024-08-26]. <https://www.biospace.com/onward-announces-first-in-human-implant-of-arc-im-stimulator-with-brain-computer-interface-bci-to-restore-arm-hand-and-finger-function-after-spinal-cord-injury>.
- [17] Darvishi S, Datta Gupta A, Hamilton-Bruce A, et al. Enhancing poststroke hand movement recovery: Efficacy of RehabSwift, a personalized brain-computer interface system[J]. PNAS Nexus, 2024, 3(7): pgae240.
- [18] Hong X, Lu Z K, Teh I, et al. Brain plasticity following MI-BCI training combined with tDCS in a randomized

- trial in chronic subcortical stroke subjects: A preliminary study[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 9222.
- [19] Neuroolutions. Neuroolutions receives U. S. Food and Drug Administration de novo market authorization for ipsihandtm upper extremity rehabilitation system[EB/OL]. (2021-04-26)[2024-08-26]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/04/26/2216682/0/en/Neuroolutions-Receives-U-S-Food-and-Drug-Administration-De-Novo-Market-Authorization-for-IpsiHand-Upper-Extremity-Rehabilitation-System.html>.
- [20] Willett F R, Avansino D T, Hochberg L R, et al. High-performance brain-to-text communication *via* handwriting[J]. *Nature*, 2021, 593(7858): 249-254.
- [21] Waisberg E, Ong J, Lee A G. Ethical considerations of neuralink and brain-computer interfaces[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2024, 52(8): 1937-1939.
- [22] Naddaf M, Drew L. Second brain implant by Elon Musk's Neuralink: Will it fare better than the first[J]. *Nature*, 2024, 632(8025): 481-482.
- [23] 中国科学报: 全球首款脑—机接口专用芯片问世 “意念控制” 距离我们还有多远?[EB/OL]. (2019-05-31)[2019-05-31]. <http://news.tju.edu.cn/info/1005/45374.htm>.  
China Science Daily: The world's first dedicated brain-computer interface chip unveiled—How far are we from “mindcontrol” [EB/OL]. (2019-05-31)[2019-05-31]. <http://news.tju.edu.cn/info/1005/45374.htm>. (in Chinese)
- [24] Chang L, Yang B H, Zhang J Y, et al. DSTA-Net: Dynamic spatio-temporal feature augmentation network for motor imagery classification[J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2025, 19(1): 118.
- [25] Huang Q Y, Zhang Z J, Yu T Y, et al. An EEG-/ EOG-based hybrid brain-computer interface: Application on controlling an integrated wheelchair robotic arm system[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13: 1243.
- [26] Wang W, Yang B H, Guan C T, et al. A VR combined with MI-BCI application for upper limb rehabilitation of stroke[C]//2019 IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [27] Zhao C G, Ju F, Sun W, et al. Effects of training with a brain-computer interface-controlled robot on rehabilitation outcome in patients with subacute stroke: A randomized controlled trial[J]. *Neurology and Therapy*, 2022, 11(2): 679-695.
- [28] Miao Y Y, Chen S G, Zhang X R, et al. BCI-based rehabilitation on the stroke in sequela stage[J]. *Neural Plasticity*, 2020: 8882764.
- [29] Xu F, Yan Y, Zhu J, et al. Self-Supervised EEG representation learning with contrastive predictive coding for post-stroke patients[J]. *International Journal of Neural Systems*, 2023, 33(12): 2350066.
- [30] 脑机接口技术: 从生活走向太空[N]. 光明日报, 2020-08-30(04).  
Brain-computer interface technology: From daily life to outer space[N]. *Guangming Daily*, 2020-08-30(04).
- [31] 浙江大学完成国内首例植入式脑机接口临床转化研究[EB/OL]. (2020-01-17)[2026-03-04]. <https://www.zju.edu.cn/2020/0117/c41533a1957263/page.htm>.  
Zhejiang University. Zhejiang University completes the first domestic clinical translational study of implantable brain-computer interface[EB/OL]. (2020-01-17)[2026-03-04]. <https://www.zju.edu.cn/2020/0117/c41533a1957263/page.htm>. (in Chinese)
- [32] 清华大学. 清华大学合作成功进行无线微创脑机接口临床试验[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-04-02]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/3045/110266.htm>.  
Tsinghua University. Tsinghua University successfully conducts clinical trial of wireless minimally invasive brain-computer interface[EB/OL]. (2024-04-02)[2024-04-02]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/3045/110266.htm>. (in Chinese)
- [33] 北脑一号完成首批无线人体全植入[EB/OL]. (2025-03-24)[2026-03-04]. <https://www.news.cn/tech/20250324/6e6f75e3ad14498292bf1ec3265a3674/c.html>.  
“Beinao-1” completes first batch of wireless fully implantable human procedures[EB/OL]. (2025-03-24)[2026-03-04]. <https://www.news.cn/tech/20250324/6e6f75e3ad14498292bf1ec3265a3674/c.html>. (in Chinese)
- [34] Wang K, Wang Y P, Li M L, et al. Challenges and prospects of BCI-based robot systems for stroke rehabilitation[J]. *EngMedicine*, 2025, 2(4): 100102.
- [35] Liao W, Li J, Zhang X, et al. Motor imagery

- brain-computer interface rehabilitation system enhances upper limb performance and improves brain activity in stroke patients: A clinical study[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2023, 17: 1117670.
- [36] 谢士遥, 汤佳贝, 蔡雨, 等. 脑电 BCI 系统的软硬件开发平台发展现状[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(6): 1-12.
- Xie S Y, Tang J B, Cai Y, et al. Review on software and hardware platforms for EEG-based BCI system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(6): 1-12. (in Chinese)
- [37] Wang K, Wang Z P, Guo Y, et al. A brain-computer interface driven by imagining different force loads on a single hand: An online feasibility study[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2017, 14: 93.
- [38] Yi W B, Qiu S, Wang K, et al. EEG oscillatory patterns and classification of sequential compound limb motor imagery[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2016, 13: 11.
- [39] Xie Y T, Wang K, Meng J Y, et al. Cross-dataset transfer learning for motor imagery signal classification via multi-task learning and pre-training[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2023, 20(5): 056037.
- [40] 人工智能医疗器械创新合作平台. 脑机接口技术在医疗健康领域应用白皮书 (2023 年)[EB/OL]. (2024-08-26)[2026-03-04]. <http://aimd.org.cn/newsinfo/6513798.html templateId=506998>.
- Artificial Intelligence Medical Device Innovation Cooperation Platform. White paper on the application of brain-Computer interface technology in the healthcare field (2023)[EB/OL]. (2024-08-26)[2026-03-04]. <http://aimd.org.cn/newsinfo/6513798.html templateId=506998>. (in Chinese)
- [41] Vansteensel M J, Klein E, van Thiel G, et al. Towards clinical application of implantable brain-computer interfaces for people with late-stage ALS: Medical and ethical considerations[J]. *Journal of Neurology*, 2023, 270(3): 1323-1336.
- [42] Humphrey D R, Schmidt E M, Thompson W D. Predicting measures of motor performance from multiple cortical spike trains[J]. *Science*, 1970, 170(3959): 758-762.
- [43] 张喆, 赵旭, 马艺昕, 等. 脑机接口技术伦理规范考量[J]. *生物医学工程学杂志*, 2023, 40(2): 358-364.
- Zhang Z, Zhao X, Ma Y X, et al. Ethics considerations on brain-computer interface technology[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2023, 40(2): 358-364. (in Chinese)

## Review of Active Motor Rehabilitation Techniques with Motor Imagery Based Brain-Computer Interface

WANG Kun<sup>1,2</sup>, HUANG Yining<sup>1</sup>, LIU Yuwei<sup>1</sup>, WANG Yupeng<sup>1</sup>, WU Hongru<sup>1</sup>, YANG Xinyi<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, XU Minpeng<sup>1,2\*</sup>

1. Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Haihe Laboratory of Brain-Computer Interaction and Human-Machine Integration, Tianjin 300392, China

**Abstract** High disability rates resulting from stroke have become a severe public health challenge in China, imposing a significant mental and economic burden on families and society. Motor imagery brain-computer interface (MI-BCI) based on scalp electroencephalogram (EEG) has demonstrated immense potential in promoting neural pathway remodeling through an intent-driven active rehabilitation mode. Currently, the strategic deployment of global brain initiatives is accelerating technology integration and industrial transformation in this field. This paper reviews the research progress and status of MI-BCI technology oriented toward active motor rehabilitation. It analyzes the key problems and challenges currently encountered and proposes strategic recommendations for future development. This work aims to provide a reference for breaking through core technical barriers and constructing an independent and controllable active rehabilitation technology system in China.

**Keywords** brain-computer interface; motor imagery; active motor rehabilitation; electroencephalogram



王坤，副教授/正高级工程师。ISO/IEC JTC 1/SC 43 WG5 数据工作组专家，中国研究型医院学会神经再生与修复专业委员会委员。主要从事脑机接口、运动意图脑电信号特征提取及其在神经康复中的应用等研究。主持或参与国家重点研发计划、国家自然科学基金等 10 项。获天津市技术发明一等奖，全国首届博士后创新创业大赛银奖（创新赛）。发表学术论文 30 余篇，授权发明专利 10 余件。

电子信箱：[flora\\_wk@tju.edu.cn](mailto:flora_wk@tju.edu.cn)。



许敏鹏，教授。天津大学医学工程与转化医学研究院副院长，IEEE Senior Member。主要从事脑机接口等研究。主持国家级、省部级项目 10 余项。入选长江学者奖励计划、“2023 脑科学与类脑智能科创新青年 30 人”、2022 年度《麻省理工科技评论》“35 岁以下科技创新 35 人”（中国区）；获“强国青年科学家”称号、首届中国脑机接口“华璠学者奖”杰出青年奖。发表学术论文 200 余篇，授权发明专利 40 余件。

电子信箱：[xmp52637@tju.edu.cn](mailto:xmp52637@tju.edu.cn)。

---

†Corresponding author