

# 脑卒中上肢康复机器人研究进展

王壮 王轶钊 丘世因 刘源 石巍 巫嘉陵 明东

**【摘要】** 随着医工融合技术的发展与临床康复需求的提高,智能化上肢康复机器人因可为脑卒中患者提供高强度、高重复性主动康复训练,恢复上肢运动功能,实现脑神经重塑等作用,成为脑卒中康复领域的研究热门,但目前大多数上肢康复机器人系统仍处于实验室研发或临床验证阶段。本文总结国内外上肢康复机器人的最新研究成果,对比不同类型机器人的优势与不足,展望上肢康复机器人发展趋势,为促进其临床转化提供思路。

**【关键词】** 卒中; 运动障碍; 上肢; 机器人; 康复; 综述

## Research progress on upper limb rehabilitation robots for stroke

WANG Zhuang<sup>1</sup>, WANG Yi-zhao<sup>2</sup>, QIU Shi-yin<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>3</sup>, WU Jia-ling<sup>4</sup>, MING Dong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Department of Rehabilitation Medicine, <sup>4</sup>Department of Neurology, Tianjin Key Laboratory of Cerebral Vascular and Neurodegenerative Diseases, Tianjin Huanhu Hospital, Tianjin 300350, China

<sup>3</sup>Center for Medical Device Evaluation and Inspection of Tianjin, Tianjin 300191, China

WANG Zhuang and WANG Yi-zhao contributed equally to the article

Corresponding authors: LIU Yuan (Email: ryanliu@tju.edu.cn); SHI Wei (Email: 25558503@qq.com)

**【Abstract】** With the development of the combination of medicine and engineering and the improvement of clinical rehabilitation demand, intelligent upper limb rehabilitation robots can provide stroke patients with high intensity and repetition of active rehabilitation training to restore the upper limb motor function and achieve the remodeling of damaged brain nerves. However, many upper limb rehabilitation robot systems are still in the stage of laboratory development or clinical verification. This paper summarizes the latest research results of upper limb rehabilitation robots at home and abroad, compares the advantages and disadvantages of different types of robots, looks forward to the development trend of upper limb rehabilitation robots, and provides ideas for further promoting clinical transformation.

**【Key words】** Stroke; Motor disorders; Upper extremity; Robotics; Rehabilitation; Review

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF1202500, 2022YFF1202505), the National Natural Science Foundation of China (No. 62273251), and Tianjin Science and Technology Plan Project (No. 21JCYBJC00420).

**Conflicts of interest:** none declared

脑卒中是严重危害国民健康的重大慢性非传

染性疾病,是我国成人病残的首位病因<sup>[1-2]</sup>。脑卒中后遗留不同程度功能障碍,其中75%表现为上肢运动障碍,最终仅20%发病后6个月内可恢复部分上肢运动功能<sup>[3]</sup>。由于上肢及手部运动功能恢复是患者重获生活自理能力的核心<sup>[4]</sup>,故及时进行上肢康复训练对提高患者生活质量、减轻家庭和社会经济负担具有重要意义<sup>[5]</sup>。目前的传统运动康复训练主要为康复治疗师手工按摩或指导患者完成康复任务,患者被动接受训练,康复效果受康复治疗师水平、训练强度等因素的影响<sup>[6]</sup>,而且我国康复治疗师数量严重不足,无法一对一提供充足、个体化、高质量的康复训练<sup>[7]</sup>。随着医工融合技术的发展,神经

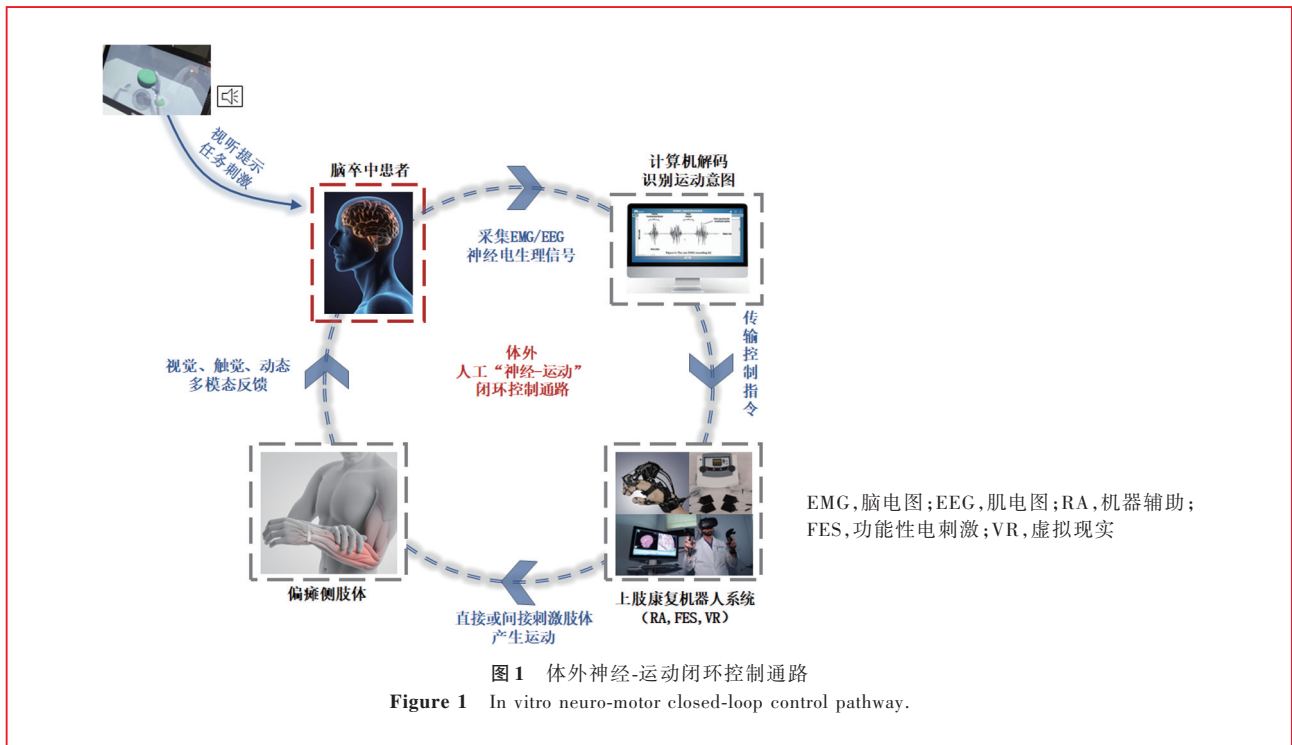
doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2023.01.004

基金项目:国家重点研发计划项目(项目编号:2022YFF1202500);国家重点研发计划项目(项目编号:2022YFF1202505);国家自然科学基金资助项目(项目编号:62273251);天津市科技计划项目(项目编号:21JCYBJC00420)

作者单位:300072 天津大学医学工程与转化医学研究院(王壮,丘世因,刘源,明东);300350 天津市环湖医院康复医学科(王轶钊),神经内科 天津市脑血管与神经变性重点实验室(巫嘉陵);300191 天津市医疗器械审评查验中心(石巍)

王壮与王轶钊对本文有同等贡献

通讯作者:刘源,Email:ryanliu@tju.edu.cn;  
石巍,Email:25558503@qq.com



工程技术不断革新,基于机器人系统的康复设备可替代康复治疗师为患者提供高强度、高重复性、精准的主动康复训练,以重塑神经功能、恢复运动功能<sup>[8]</sup>。目前上肢康复机器人种类繁多,但多数报道专注于康复效果的评价<sup>[9-10]</sup>,鲜有针对不同类型上肢康复机器人的研究。本文拟在运动神经康复的技术理论基础上,系统阐述脑卒中上肢康复机器人的分类及研究现状并展望未来发展趋势,以期促进上肢康复机器人更好地应用于临床。

### 一、运动神经康复的技术理论基础

早在 20 世纪初期,欧美等发达国家即陆续提出脑卒中后运动障碍康复治疗技术与方法,如 Bobath 神经发育疗法、Brunnstrom 运动疗法等。但是上述传统方法注重局部治疗,缺乏整体治疗理念,逐渐无法适应患者的康复需求,需进一步发展面向脑卒中患者运动神经康复的新技术、新方法。运动再学习(MRP)是 20 世纪 80 年代初由 Janet Carr 和 Roberta Shepherd 教授提出的一种运动神经康复技术体系<sup>[11]</sup>。该技术体系将中枢神经系统损伤后运动功能的康复训练视为一种再学习或再训练过程,主要以生物力学、运动科学、神经科学、行为科学等作为理论基础,以任务或功能动作为导向,强调患者主动参与并注重反馈,以恢复原有运动功能。神经可塑性作为脑神经的重要属性,是中枢神经系统

损伤后重组并保持适当功能的基础,是实现相应运动功能康复的重要组成部分,是大脑根据经验修正编码和学习新行为的过程,通过增加或改变原有神经突触以适应环境或修正行为<sup>[12]</sup>,包括突触发芽、神经发生与长时程作用增强等一系列结构和生理变化,进而诱发神经回路信息传递的增强、功能作用的修复及功能重组的形成<sup>[13]</sup>。基于上述理论机制,以实现特定神经功能训练增强、重组修复为目标的上肢康复机器人应运而生(图 1)。运动康复机器人通过导向性任务提示或游戏积极调动患者主动参与,通过传感设备实时感知人体神经电生理信号,并借助先进的信息处理技术完成神经电生理信号的快速解码,以实现运动意图的识别,驱动效应器,进而匹配相应的视觉、触觉等多模态反馈方式,通过工程方式[如脑机接口(BCI)驱动的功能性电刺激系统]搭建一条新的在线反馈大脑工作状态的神经-运动闭环控制通路。康复机器人通过高强度、高重复性运动训练,促使脑神经重塑,促进运动功能康复。

### 二、上肢康复机器人分类与研究现状

上肢康复机器人最早可追溯至 20 世纪 90 年代,神经工程技术尚不发达,神经电生理信号的获取与识别能力较弱,早期的机器人大多是被动带动患者进行上肢康复训练。近年来,随着神经康复理

论的发展,研究者逐渐重视患者在运动康复训练中的主动性。上肢康复机器人按照运动意图识别方式分为基于肌电信号的康复机器人系统和基于脑机接口的康复机器人系统;按照反馈方式分为基于机器辅助(RA)的康复机器人系统、基于功能性电刺激(FES)的康复机器人系统和基于虚拟现实(VR)的康复机器人系统。

1. 基于肌电信号的康复机器人系统 2021年,香港中文大学 Shi 等<sup>[14]</sup>研发出一款肌电信号驱动的柔性手部机器人系统,主要通过患者指伸肌(用于控制手部伸展)和拇短展肌(用于控制手部闭合)以控制软弹性复合执行器(SECA),若相应肌肉的单通道肌电信号幅值超过预设阈值,则触发 SECA 进行加压或减压,以实现该手部机器人的伸展与闭合;他们同期进行临床试验,共纳入 16 例脑卒中慢性期[病程(3.54 ± 3.98)年]患者,完成为期 7 周(共 20 次)的机器人辅助上肢康复训练,结果显示,9 例上肢动作研究测验量表(ARAT)、Fugl-Meyer 上肢评价量表(FMA-UE)、盒子和障碍物测验(BBT)评分增加,表明上肢运动功能恢复良好;余 7 例因治疗前手部中至重度痉挛[改良 Ashworth 量表(MAS)评分 > 2 分],使得康复训练期间肌电信号控制效果欠佳,康复效果不显著,提示该手部机器人对所纳入患者的手部运动功能有较高要求,且该项研究将患侧指伸肌和拇短展肌存在残留肌电信号作为纳入标准也极大地限制了该机器人系统的适用人群。2022 年,香港理工大学 Nam 等<sup>[15]</sup>研发出一款肌电驱动融合神经肌肉电刺激、柔性气动肌肉及外骨骼技术的 Exoneuromusculoskeleton 上肢康复机器人系统,通过肱二头肌、肱三头肌肌电信号控制肘部屈曲与伸展,通过桡侧腕屈肌与指深屈肌、尺侧腕伸肌与指伸肌控制手腕及手掌的屈曲与伸展,若肌电信号幅值超过预设阈值则触发神经肌肉电刺激器与气动肌肉带动患侧上肢进行运动康复训练;他们同期进行临床试验,共纳入 15 例慢性脑卒中患者,辅助上肢机器人康复训练(3~5 次/周,共 20 次),结果显示,康复训练后患者肘部、手腕和手指自主运动功能均显著改善( $P < 0.05$ )。该项研究同样将患侧肢体驱动肌存在残留肌电信号作为纳入标准,亦限制该机器人系统的适用人群;安全性方面,长时间通过肌电信号驱动康复系统易引起肌肉过度疲劳,同时予以神经肌肉电刺激可加剧肌肉疲劳程度,增加患侧肢体受伤风险<sup>[16]</sup>。

2. 基于脑机接口的康复机器人系统 脑机接口可以为大脑提供一种更直接的信息交换与控制通路<sup>[17-18]</sup>,有助于神经和肌肉功能障碍患者与外界环境进行交互<sup>[19]</sup>,已成为脑卒中运动神经康复的重要技术。业已证实基于脑机接口的康复机器人系统对脑卒中患者上肢运动功能的康复安全有效<sup>[4]</sup>。Carino-Escobar 等<sup>[20]</sup>研发出一款基于运动想象(MI)的脑机接口上肢康复机器人系统,通过测定运动想象时感觉运动节律(SMR)的事件相关去同步(ERD)/事件相关同步(ERS),感知患者主动运动意图,驱动手部外骨骼提供相应的动觉反馈,形成意图-运动-感觉的闭环控制通路,并通过重复训练重塑脑区功能。一项随机对照临床试验共纳入 28 例脑卒中慢性期患者,进行为期 4 周、5 次/周的康复训练,实验组(16 例)通过运动想象诱发的 ERD 以控制机械臂运动,对照组(12 例)予以假试验即机械臂随机运动,结果显示,实验组患者 FMA-UE 评分较治疗前增加( $P = 0.015$ ),而对照组则无明显变化( $P = 0.070$ ),表明脑卒中患者进行脑机接口训练后可促进运动功能恢复和受损脑区皮质功能重组<sup>[21]</sup>。相较于肌电信号,脑机接口绕过周围神经系统,不占用肢体运动自由度,适用于重度偏瘫无残留肌电信号的脑卒中患者;运动想象某一动作所引起的神经活动区域与实际执行该动作的区域十分相似<sup>[22]</sup>,对脑卒中患者受损脑区功能的重塑具有重大意义;此外,有研究发现, $\mu$  节律(8~13 Hz)和  $\beta$  节律(13~30 Hz)下脑电信号变化趋势与上肢运动功能恢复具有较强的相关性<sup>[23]</sup>,因此认为,患者主动运动意图诱发的脑电信号可以作为一种客观评价指标,为脑卒中康复效果和预后评估提供有价值的信息<sup>[24]</sup>。

3. 基于机器辅助的康复机器人系统 基于机器辅助的康复机器人系统按照机器人系统的功能形式分为末端牵引式、外骨骼式及新近兴起的外肢体式共 3 种。(1)末端牵引式:主要通过末端结构带动肢体一端进行康复训练。最典型的是 1991 年由美国麻省理工学院研制的国际首款康复机器人系统 MIT-MANUS<sup>[25-26]</sup>,采用选择顺应性装配机器人手臂(SCARA)串联式五连杆结构,机器人手臂末端有 2 个自由度,可辅助患者进行肩关节、肘关节水平面康复训练,上肢运动障碍患者在该机器人的牵引下,以预设轨迹完成被动康复训练,也可增加适当阻尼以辅助患者进行肌力训练。2019 年,新西兰 Sheng 等<sup>[27]</sup>研发出一款可以提供双边康复训练的工业机



图2 脑控外肢体手指机器人系统(左图为外肢体手指系统的穿戴实物图,右图为外肢体手指配合人手实现抓握功能的三维示意图)<sup>[39]</sup>

**Figure 2** Brain controlled finger system of external limb (The left figure shows the wearing physical picture of finger system of external limb, and the right figure shows the 3D schematic diagram of grasping function achieved by external limb fingers and human hand)<sup>[39]</sup>.

器人系统——双侧康复系统(IRBRS),该系统主要由两个工业机械臂(UR5和UR10)组成,使患侧肢体以同步复制健侧肢体的运动,从而更有效地激活受损脑区,恢复患者运动功能<sup>[28]</sup>。(2)外骨骼式:常设计为典型的仿生手臂结构形式并穿戴至上肢,可以精确控制各关节,实现单关节独立运动和多关节复合运动。匈牙利Toth等<sup>[29]</sup>研发出一款被动式上肢康复机器人系统——REHAROB,具有3个自由度,运动轨迹由康复治疗师预先编程,通过缓慢重复运动以增加脑卒中患者患侧肩关节、肘关节的活动范围。随后,美国华盛顿大学Perry教授团队研发出一款电缆驱动的轻巧型外骨骼式上肢康复机器人系统——CADEN-7,通过柔性驱动方式在一定程度上避免机器人系统的过度伸展和不稳定运动<sup>[30]</sup>,但因其驱动方式特殊,须与外部驱动设备连接,不易携带。末端牵引式与外骨骼式上肢康复机器人系统均可为患者提供精确、定量、高强度的运动康复训练,但二者本质是带动患侧肢体被动运动,对上肢或手部痉挛严重的脑卒中患者易产生二次伤害,存在一定安全隐患;还可因上肢或手部痉挛而减少机器人辅助康复训练的强度或次数,易错过脑卒中康复关键时期而影响康复效果;此外,这两种形式的机器人系统均较庞大<sup>[28,31]</sup>,给患者带来较大的身体负担。(3)外肢体式:作为一种独立存在于人体自然肢体外的新型可穿戴式机器人系统<sup>[32]</sup>,为上述问题提供了解决之法。“外肢体”的概念于2012年被首次

提出,最早应用于高空、工业等特殊领域的人体增强<sup>[33-35]</sup>。近年来,研究者尝试挖掘其在康复领域的应用潜力。有研究将外肢体手指作为一种辅助工具,通过肌电信号驱动佩戴在手腕处的外肢体手指张开或闭合,即时代偿脑卒中患者的运动功能<sup>[36-37]</sup>。进一步研究显示,健康人佩戴外肢体手指并经数分钟运动想象训练后,可迅速重塑前臂和手部肌肉的皮质脊髓输出模式,表明额外的手指被迅速编码至患者身体表征中,重塑额顶叶邻近控制手部抓取的神经网络<sup>[38]</sup>。2022年,天津大学刘源教授团队研发出一款脑控外肢体手指机器人系统(图2),并招募30例健康志愿者进行为期4周、5次/周的脑控外肢体训练,采集并识别受试者运动想象的脑电信号,驱动外肢体手指机器人运动,静息态fMRI(rs-fMRI)显示,小脑静息态低频振荡振幅(ALFF)和局部一致性(ReHo)显著提高,提示小脑静息态激活强度和局部活跃度增强,表明脑控外肢体训练可以促进小脑和大脑神经对额外肢体表征形式的重塑<sup>[39-40]</sup>,为脑卒中患者的临床康复提供了一种基于人体增强设备的新概念。然而目前对外肢体式上肢康复机器人系统的研究尚处于起步阶段,该机器人仅表现出对运动及神经功能增强和重塑的潜力,而对本体运动功能的康复与诱导刺激不直接,缺乏直接证据证明其有助于脑卒中患者运动康复训练。未来可以与外骨骼式、基于功能性电刺激等其他形式的康复机器人系统结合,提高其康复效果。

4. 基于功能性电刺激的康复机器人系统 功能性电刺激是重建肌肉活动的一种有效方法,将一定强度的周期性电刺激作用于特定肌肉或神经,诱发肌肉运动或模拟正常自主运动,进而改善或恢复患侧肢体运动功能<sup>[41]</sup>。功能性电刺激除可作为一种神经假体代偿运动功能外<sup>[42]</sup>,还可作为一种脑卒中康复治疗方法以恢复患侧肢体运动功能<sup>[43-45]</sup>。美国西北大学 Lan 等<sup>[44]</sup>研发出一款肌电信号驱动型功能性电刺激系统,有助于运动障碍患者在日常生活中更有效、灵活地完成伸手和提举动作。天津大学明东教授团队集成脑机接口与功能性电刺激研发出一款新型人工神经康复系统,并纳入 32 例脑卒中慢性期患者进行随机对照临床试验,实验组(16 例)予新型人工神经康复系统进行康复训练(40 min/次、11 次,共 3 周),对照组(16 例)通过商用化的低频电刺激器进行康复训练(40 min/次、11 次,共 3 周),结果显示,实验组患者训练前后 Fugl-Meyer 量表(FMS)评分的增加值高于对照组( $P=0.009$ ),且其运动想象时  $\mu$  节律下 ERD 现象与康复训练时间呈负相关( $r=-0.624, P=0.004$ ),表明集成脑机接口与功能性电刺激的新型人工神经康复系统可以显著改善脑卒中患者运动功能和神经功能<sup>[23]</sup>。与基于机器辅助的康复机器人系统相比,基于功能性电刺激的康复机器人系统可增强运动皮质的神经可塑性和皮质脊髓束的兴奋性,有助于脑卒中患者在较短时间内恢复上肢肌力和运动功能<sup>[42]</sup>。但该机器人系统需患者承受较大的身体负担<sup>[46]</sup>,且康复效果很大程度受电流强度、频率、持续时间等治疗参数的影响,此外还要求康复治疗师具备一定的解剖学知识,以正确刺激目标肌群<sup>[47]</sup>。

5. 基于虚拟现实的康复机器人系统 虚拟现实技术是利用计算机合成三维环境模型并创建和体验虚拟世界的技术,是一种多源信息融合交互式的三维动态视景和实体行为的系统仿真,允许患者与模拟的多感官环境进行交互<sup>[48]</sup>。2016 年,美国卒中协会(ASA)推荐,对脑卒中患者进行虚拟现实康复训练可使患者积极参与康复治疗过程,促进上肢运动功能恢复(B 级推荐)<sup>[49]</sup>。相较于传统的物理疗法,基于虚拟现实的上肢康复机器人辅助康复训练可以更显著地改善脑卒中患者上肢运动功能<sup>[50-51]</sup>。2019 年开展的一项临床研究纳入 10 例存在上肢运动障碍的脑卒中慢性期患者,通过商业化的虚拟现实设备 Oculus Rift 为患者提供一种沉浸式康复训练

环境,经过为期 4 周(30 min/次,共 12 次)的训练后, FMA-UE 和 ARAT 评分增加,表明上肢运动功能恢复良好,且无设备相关不良事件,提示沉浸式虚拟现实康复训练是一种有效、安全且耐受性良好的运动康复策略<sup>[52]</sup>。2018 年,韩国首尔国立大学 Choi 和 Paik<sup>[53]</sup>研发出一种运动类虚拟现实游戏程序,该机器人系统结合传统康复训练的康复疗效优于传统康复训练,且具有较高的满意度;其游戏程序基于手机与平板电脑设计开发,使康复方案易于实施,减少训练成本;但这也降低游戏的体验感,无法为患者提供沉浸式康复训练环境。

### 三、总结与展望

智能化上肢康复机器人系统可以作为一种替代传统康复治疗师的有效手段,但目前大多数系统处于实验室研发或临床验证阶段,距大规模市场化推广尚有很长的距离。未来该领域的关键进步还需要从以下几方面突破:首先,提高人体意图识别的准确性。错误的运动意图识别带来的反馈可能影响机器人系统的康复效果<sup>[4]</sup>。研究者应着手于高分辨率脑电信号的诱发、采集和解码方式,以实现高性能运动意图的识别,形成正确、即时的反馈,使患者以更高的积极性参与到主动康复的良性循环中,从而更有效地诱发脑神经重塑。其次,实验室研发阶段应充分探讨康复机器人系统设计的安全性和舒适性反馈。手部外骨骼式机器人系统可以为偏瘫患者提供高强度、定量、高重复性运动康复训练,但对手部肌张力过高或弛缓性瘫痪患者具有一定的安全隐患。未来应进一步研发柔性、轻巧、便携的辅助机器人系统;规范功能性电刺激刺激频率、持续时间等治疗参数;研发多种类型康复机器人的耦合系统<sup>[16]</sup>等,进一步提高机器人系统的安全性和舒适性。最后,实现康复机器人系统的临床研究及转化。面对我国日渐严峻的脑卒中患病形势及智能康复辅助工具落后的现状,未来应进一步规范设计临床试验方案,开展多中心合作的临床研究,扩大样本量,加速推进智能医疗康复设备的创新与转化。

利益冲突 无

### 参 考 文 献

- [1] Report on stroke prevention and treatment in China Writing Group. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2020[J]. Zhongguo Nao Xue Guan Bing Za Zhi, 2022, 19:136-144.[《中国脑卒中防治报告 2020》编写组.《中国脑卒

- 中防治报告 2020》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2022, 19:136-144.]
- [2] Wu S, Wu B, Liu M, Chen Z, Wang W, Anderson CS, Sandercock P, Wang Y, Huang Y, Cui L, Pu C, Jia J, Zhang T, Liu X, Zhang S, Xie P, Fan D, Ji X, Wong KL, Wang L; China Stroke Study Collaboration. Stroke in China: advances and challenges in epidemiology, prevention, and management [J]. *Lancet Neurol*, 2019, 18:394-405.
- [3] Liu M, Ushiba J. Brain - machine Interface (BMI) - based neurorehabilitation for post-stroke upper limb paralysis[J]. *Keio J Med*, 2022, 71:82-92.
- [4] Baniqued PDE, Stanyer EC, Awais M, Alazmani A, Jackson AE, Mon-Williams MA, Mushtaq F, Holt RJ. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18:15.
- [5] Everard G, Declerck L, Detrembleur C, Leonard S, Bower G, Dehem S, Lejeune T. New technologies promoting active upper limb rehabilitation after stroke: an overview and network meta-analysis[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2022, 58:530-548.
- [6] Zhang L, Jia G, Ma J, Wang S, Cheng L. Short and long-term effects of robot-assisted therapy on upper limb motor function and activity of daily living in patients post-stroke: a meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19:76.
- [7] Yu L, Yu HL. Research and development of upper limb rehabilitation robot technology [J]. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Jin Zhan*, 2020, 41:134-138.[余灵, 喻洪流. 上肢康复机器人研究进展[J]. *生物医学工程学进展*, 2020, 41:134-138.]
- [8] Terranova TT, Simis M, Santos ACA, Alfieri FM, Imamura M, Fregni F, Battistella LR. Robot-assisted therapy and constraint-induced movement therapy for motor recovery in stroke: results from a randomized clinical trial[J]. *Front Neurobot*, 2021, 15: 684019.
- [9] Doumas I, Everard G, Dehem S, Lejeune T. Serious games for upper limb rehabilitation after stroke: a meta-analysis [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18:100.
- [10] Chien WT, Chong YY, Tse MK, Chien CW, Cheng HY. Robot-assisted therapy for upper-limb rehabilitation in subacute stroke patients: a systematic review and meta-analysis [J]. *Brain Behav*, 2020, 10:e01742.
- [11] Gustavsen M, Jansen R, Kjendahl A, Lorentzen A. Motor Relearning Program approach improves short-term motor outcomes and reduces hospital stay after stroke [J]. *Aust J Physiother*, 2002, 48:59.
- [12] Sun Y, Zehr EP. Training-induced neural plasticity and strength are amplified after stroke[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2019, 47:223-229.
- [13] Adkins DL, Boychuk J, Remple MS, Kleim JA. Motor training induces experience-specific patterns of plasticity across motor cortex and spinal cord[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2006, 101: 1776-1782.
- [14] Shi XQ, Heung HL, Tang ZQ, Li Z, Tong KY. Effects of a soft robotic hand for hand rehabilitation in chronic stroke survivors [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2021, 30:105812.
- [15] Nam C, Rong W, Li W, Cheung C, Ngai W, Cheung T, Pang M, Li L, Hu J, Wai H, Hu X. An exoneuromusculoskeleton for self-help upper limb rehabilitation after stroke[J]. *Soft Robot*, 2022, 9:14-35.
- [16] Khan MA, Das R, Iversen HK, Puthusserypady S. Review on motor imagery based BCI systems for upper limb post-stroke neurorehabilitation: from designing to application [J]. *Comput Biol Med*, 2020, 123:103843.
- [17] Gao X, Wang Y, Chen X, Gao S. Interface, interaction, and intelligence in generalized brain-computer interfaces[J]. *Trends Cogn Sci*, 2021, 25:671-684.
- [18] Abiri R, Borhani S, Sellers EW, Jiang Y, Zhao X. A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms[J]. *J Neural Eng*, 2019, 16:011001.
- [19] Hochberg LR, Bacher D, Jarosiewicz B, Masse NY, Simeral JD, Vogel J, Haddadin S, Liu J, Cash SS, van der Smagt P, Donoghue JP. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm[J]. *Nature*, 2012, 485: 372-375.
- [20] Carino - Escobar RI, Carrillo - Mora P, Valdés - Cristerna R, Rodríguez - Barragan MA, Hernandez - Arenas C, Quinzaños - Fresnedo J, Galicia - Alvarado MA, Cantillo - Negrete J. Longitudinal analysis of stroke patients' brain rhythms during an intervention with a brain-computer interface [J]. *Neural Plast*, 2019:ID7084618.
- [21] Ramos-Murguialday A, Curado MR, Broetz D, Yilmaz Ö, Brasil FL, Liberati G, Garcia-Cossio E, Cho W, Caria A, Cohen LG, Birbaumer N. Brain-machine interface in chronic stroke: randomized trial long-term follow-up [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2019, 33:188-198.
- [22] Hardwick RM, Caspers S, Eickhoff SB, Swinnen SP. Neural correlates of action: comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2018, 94:31-44.
- [23] Chen L, Gu B, Wang Z, Zhang L, Xu M, Liu S, He F, Ming D. EEG-controlled functional electrical stimulation rehabilitation for chronic stroke: system design and clinical application [J]. *Front Med*, 2021, 15:740-749.
- [24] Nojima I, Sugata H, Takeuchi H, Mima T. Brain-computer interface training based on brain activity can induce motor recovery in patients with stroke: a meta-analysis [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2022, 36:83-96.
- [25] Hogan N, Krebs HI, Charnarong J, Srikrishna P, Sharon A. MIT-MANUS: a workstation for manual therapy and training. I [C]. *Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Tokyo, Japan, 1992. New York: IEEE, 1992: 161 - 165 [2022 - 09 - 30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/253895>.
- [26] Krebs HI, Hogan N, Aisen ML, Volpe BT. Robot-aided neurorehabilitation[J]. *IEEE Trans Rehabil Eng*, 1998, 6:75-87.
- [27] Sheng B, Xie S, Tang L, Deng C, Zhang Y. An industrial robot-based rehabilitation system for bilateral exercises [J]. *IEEE Access*, 2019, 7:151282-151294.
- [28] Richardson MC, Tears C, Morris A, Alexanders J. The effects of unilateral versus bilateral motor training on upper limb function in adults with chronic stroke: a systematic review [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2021, 30:105617.
- [29] Toth A, Fazekas G, Arz G, Jurak M, Horvath M. Passive robotic movement therapy of the spastic hemiparetic arm with REHAROB: report of the first clinical test and the follow-up system improvement [C]. 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, Chicago, United states, 2005. New York: IEEE, 2005:127-130[2022-09-30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1501067>.
- [30] Perry JC, Rosen J, Burns S. Upper-limb powered exoskeleton design[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2007, 12:408-417.
- [31] Morone G, Palomba A, Martino Cinnera A, Agostini M, Aprile I, Arienti C, Paci M, Casanova E, Marino D, LA Rosa G, Bressi F, Sterzi S, Gandolfi M, Giansanti D, Perrero L, Battistini A, Miccinilli S, Filoni S, Sicari M, Petrozzino S, Solaro CM, Gargano S, Benanti P, Boldrini P, Bonaiuti D, Castelli E,

- Draicchio F, Falabella V, Galeri S, Gimigliano F, Grigioni M, Mazzoleni S, Mazzon S, Molteni F, Petrarca M, Picelli A, Posteraro F, Senatore M, Turchetti G, Straudi S: "CICERONE" Italian Consensus Conference on Robotic in Neurorehabilitation. Systematic review of guidelines to identify recommendations for upper limb robotic rehabilitation after stroke [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2021, 57:238-245.
- [32] Praticchizzo D, Malvezzi M, Hussain I, Salvietti G. The sixth-finger: a modular extra - finger to enhance human hand capabilities [C]. The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Edinburgh, UK, 2014. New York: IEEE, 2014:993-998 [2022-09-30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6926382>.
- [33] Jing HW, Zhu YH, Zhao SK, Zhang QH, Zhao J. Research status and development trend of supernumerary robotic limbs [J]. *Ji Xie Gong Cheng Xue Bao*, 2020, 56:1-9.[荆泓玮, 朱延河, 赵思恺, 张清华, 赵杰. 外肢体机器人研究现状及发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2020, 56:1-9.]
- [34] Gan Q, Harris CJ. A hybrid learning scheme combining EM and MASMOD algorithms for fuzzy local linearization modeling [J]. *IEEE Trans Neural Netw*, 2001, 12:43-53.
- [35] Carter - Davies D, Chen JS, Chen F, Li M, Yang CG. Mechatronic design and control of a 3D printed low cost robotic upper limb [C]. 2018 11th International Workshop on Human Friendly Robotics (HFR), Shenzhen, China, 2018. New York: IEEE, 2018: 1 - 6 [2022 - 09 - 30]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8633519>.
- [36] Hussain I, Salvietti G, Spagnoletti G, Praticchizzo D. The soft-sixthfinger: a wearable EMG controlled robotic extra-finger for grasp compensation in chronic stroke patients [J]. *IEEE Robot Auto Lett*, 2016, 1:57-61.
- [37] Hussain I, Spagnoletti G, Salvietti G, Praticchizzo D. An EMG interface for the control of motion and compliance of a supernumerary robotic finger [J]. *Front Neurobot*, 2016, 10:18.
- [38] Rossi S, Salvietti G, Neri F, Romanella SM, Cinti A, Sinigaglia C, Olivelli M, Lisini Baldi T, Santarnecchi E, Praticchizzo D. Emerging of new bioartificial corticospinal motor synergies using a robotic additional thumb [J]. *Sci Rep*, 2021, 11:18487.
- [39] Liu Y, Huang S, Wang Z, Ji F, Ming D. Functional reorganization after four - week brain - computer interface - controlled supernumerary robotic finger training: a pilot study of longitudinal resting - state fMRI [J]. *Front Neurosci*, 2022, 15: 766648.
- [40] Liu Y, Wang Z, Huang S, Wang W, Ming D. EEG characteristic investigation of the sixth - finger motor imagery and optimal channel selection for classification [J]. *J Neural Eng*, 2022, 19: 30.
- [41] Eraifej J, Clark W, France B, Desando S, Moore D. Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis [J]. *Syst Rev*, 2017, 6:40.
- [42] Marquez-Chin C, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for restoration of motor function after spinal cord injury and stroke: a review [J]. *Biomed Eng Online*, 2020, 19:34.
- [43] Kapadia N, Moineau B, Popovic MR. Functional electrical stimulation therapy for retraining reaching and grasping after spinal cord injury and stroke [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14:718.
- [44] Lan Y, Yao J, Dewald JP. The impact of shoulder abduction loading on EMG-based intention detection of hand opening and closing after stroke [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2011:4136-4139.
- [45] Knutson JS, Gunzler DD, Wilson RD, Chae J. Contralaterally controlled functional electrical stimulation improves hand dexterity in chronic hemiparesis: a randomized trial [J]. *Stroke*, 2016, 47:2596-2602.
- [46] Guggenberger R, Heringhaus M, Gharabaghi A. Brain-machine neurofeedback: robotics or electrical stimulation [J]? *Front Bioeng Biotechnol*, 2020, 8:639.
- [47] Sousa ASP, Moreira J, Silva C, Mesquita I, Macedo R, Silva A, Santos R. Usability of functional electrical stimulation in upper limb rehabilitation in post - stroke patients: a narrative review [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22:1409.
- [48] Karamians R, Proffitt R, Kline D, Gauthier LV. Effectiveness of virtual reality - and gaming - based interventions for upper extremity rehabilitation poststroke: a meta - analysis [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2020, 101:885-896.
- [49] Winstein CJ, Stein J, Arena R, Bates B, Cherney LR, Cramer SC, Deruyter F, Eng JJ, Fisher B, Harvey RL, Lang CE, MacKay - Lyons M, Ottenbacher KJ, Pugh S, Reeves MJ, Richards LG, Stiers W, Zorowitz RD; American Heart Association Stroke Council, Council on Cardiovascular and Stroke Nursing, Council on Clinical Cardiology, and Council on Quality of Care and Outcomes Research. Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery: a Guideline for Healthcare Professionals from the American Heart Association/American Stroke Association [J]. *Stroke*, 2016, 47:e98-169.
- [50] Ahn S, Hwang S. Virtual rehabilitation of upper extremity function and independence for stroke: a meta - analysis [J]. *J Exerc Rehabil*, 2019, 15:358-369.
- [51] Lee HS, Park YJ, Park SW. The effects of virtual reality training on function in chronic stroke patients: a systematic review and meta-analysis [J]. *Biomed Res Int*, 2019:ID7595639.
- [52] Weber LM, Nilsen DM, Gillen G, Yoon J, Stein J. Immersive virtual reality mirror therapy for upper limb recovery after stroke: a pilot study [J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2019, 98:783-788.
- [53] Choi YH, Paik NJ. Mobile game-based virtual reality program for upper extremity stroke rehabilitation [J]. *J Vis Exp*, 2018, (133):56241.

(收稿日期:2023-01-14)

(本文编辑:袁云)

**下期内容预告** 本刊2023年第2期报道专题为癫痫及发作性疾病,重点内容包括:肠道菌群与癫痫研究进展;N-甲基-D-天冬氨酸受体 *GRIN2A* 基因变异与癫痫研究进展;癫痫发作与非癫痫性发作鉴别诊断进展;癫痫药物治疗的过去、现在与未来;难治性癫痫经颅直流电刺激进展;癫痫外科与体细胞突变研究进展;自身免疫性癫痫临床研究进展;癫痫持续状态研究进展;发作性运动诱发性运动障碍神经回路研究进展;血管性眩晕与头晕临床鉴别诊断进展