

• 专题研究:神经系统疾病 •

## 柔性手部康复机器人在脑卒中患者上肢康复中的可用性研究

狄亚萱<sup>1</sup>, 孙淮庆<sup>1,2</sup>, 严 鹏<sup>1</sup>, 张蕊蕊<sup>1</sup>, 曹 辉<sup>1</sup>, 吴 婷<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>南京医科大学第一附属医院神经内科, 江苏 南京 210029; <sup>2</sup>江苏省神经退行性疾病重点实验室, 江苏 南京 211166

**[摘要]** **目的:** 探讨一款便携式柔性手部康复机器人在脑卒中患者临床与居家上肢康复中的可用性。**方法:** 招募13例脑卒中偏瘫患者进行手部康复机器人的可用性测试。患者首先在医院接受为期2周的学习与训练, 随后将设备带回家进行为期6周的居家自主康复训练, 每次33 min, 每天2次。训练结束后采用系统可用性量表(system usability scale, SUS)及半结构化访谈评估机器人的可用性。此外, 在干预前后及训练期间通过Fugl-Meyer运动功能量表上肢部分(Fugl-Meyer assessment upper extremity, FMA-UE)、行动研究手臂测试(action research arm test, ARAT)、日常生活活动量表(activities of daily living, ADL)评估患者的上肢运动功能和日常生活自理能力。**结果:** 13例患者SUS为(85.8±10.5)分, 处于“Excellent”水平。半结构化访谈结果显示, 该设备操作简便、便于携带, 但在连接、硬件稳定性及训练内容丰富度等方面仍有改进空间。干预结束后, 部分患者FMA-UE、ARAT、ADL评分较前有所改善, 达到最小临床重要差异(mini clinical important difference, MCID)。**结论:** 柔性手部康复机器人在脑卒中偏瘫患者的临床及居家康复中具有良好的可用性和安全性, 可作为脑卒中手部康复的一种潜在有效手段。

**[关键词]** 脑卒中; 可用性; 手部康复机器人; 上肢运动功能; 居家康复

**[中图分类号]** R743.3

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1007-4368(2026)04-475-07

**doi:** 10.7655/NYDXBNSN251308

## A study on the usability of a soft hand rehabilitation robot in upper limb training for stroke patients

DI Yaxuan<sup>1</sup>, SUN Huaqing<sup>1,2</sup>, YAN Peng<sup>1</sup>, ZHANG Ruirui<sup>1</sup>, CAO Hui<sup>1</sup>, WU Ting<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Neurology, the First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029; <sup>2</sup>Jiangsu Province Key Laboratory of Neurodegeneration, Nanjing 211166, China

**[Abstract]** **Objective:** To evaluate the usability of a portable soft hand rehabilitation robot in clinical and home-based upper limb rehabilitation for stroke patients. **Methods:** Thirteen stroke patients with hemiplegia were recruited to participate in a usability evaluation of the hand rehabilitation robot. Participants first received two weeks of supervised in-hospital training to learn device operation, followed by six weeks of unsupervised home-based rehabilitation (33 minutes per session, twice daily). After training, the system usability scale (SUS) and semi-structured interviews were used to assess usability of the robot. In addition, the Fugl-Meyer assessment upper extremity (FMA-UE), action research arm test (ARAT), and activities of daily living (ADL) scale were applied before and after the intervention, as well as during training, to assess patients' upper limb motor function and ability to perform activities of daily living. **Results:** The mean SUS score of the 13 participants was 85.8 ± 10.5, indicating an “Excellent” level of usability. Semi-structured interviews revealed that the device was easy to operate and portable, while highlighting areas requiring improvement, such as device connectivity, hardware stability, and training module diversity. After the intervention, several participants demonstrated improvements in FMA-UE, ARAT, and ADL scores compared with baseline, reaching the mini clinical important difference (MCID). **Conclusion:** The soft hand rehabilitation robot demonstrates high usability and safety for both clinical and home-based upper limb rehabilitation in stroke survivors with hemiplegia, suggesting its potential as a promising tool for post-stroke hand rehabilitation.

**[Key words]** stroke; usability; hand rehabilitation robot; upper limb function; home-based rehabilitation

[J Nanjing Med Univ, 2026, 46(04): 475-481]

**[基金项目]** 江苏省重点研发计划重点项目(BE2023023-2)

\*通信作者(Corresponding author), E-mail: wuting80000@126.com (ORCID: 0000-0002-7440-2884)

脑卒中是一种常见的非传染性疾病,具有发病率高、病残率高、病死率高的特点。自2015年以来,脑卒中已成为我国死亡和残疾的主要原因之一,对国民的健康构成严重威胁<sup>[1]</sup>。脑卒中高危人群筛查与干预项目数据显示,2020年我国约有340万例新发脑卒中患者,其中约12.5%遗留肢体偏瘫、语言障碍等不同程度的功能障碍<sup>[2]</sup>,给患者、家庭及社会带来沉重的经济与照顾负担<sup>[3]</sup>。已有研究证实,延长康复训练时间、提高训练强度有助于促进脑卒中患者后肢体功能恢复<sup>[4]</sup>,然而目前我国康复医疗资源相对不足且区域分布不均<sup>[5]</sup>,现行康复模式大多以一对一监督式训练为主,限制了患者获得持续、高强度康复服务的机会。因此,探索在不降低质量的前提下,为脑卒中后偏瘫患者提供低成本且可持续的康复训练方式尤为重要。

机器人辅助康复的概念在20世纪80年代即被提出<sup>[6]</sup>,随着科技与工程学的发展,康复机器人已被广泛应用于临床<sup>[7]</sup>。大量研究表明,上肢机器人辅助治疗能够提供高质量、任务特异性的训练,促进大脑神经可塑性改善<sup>[8]</sup>。无论作为常规康复的补充,还是在相同训练量条件下与传统康复对比,机器人辅助训练均可显著提升脑卒中患者的患侧上肢运动功能,并具有良好的安全性<sup>[9]</sup>。此外,基于机器设备的居家康复模式能够显著增加患者训练时长与频次,同时降低医护人力消耗<sup>[10]</sup>。然而,现有研究更多关注机器人辅助训练的疗效本身,对于设备在真实使用环境中的可用性,尤其是在出院后居家、低监督或无监督条件下的持续使用体验,仍缺乏系统评价。尽管康复机器人已逐步应用于脑卒中患者的临床康复训练,但上述问题在一定程度上制约了其在居家康复场景中的进一步推广应用。与此同时,目前多数商用康复设备体积大、结构复杂且成本较高,更适合临床环境;在家庭场景应用时仍面临空间、操作、安全性等多方面的限制<sup>[11]</sup>。因此,在居家康复情境下,设备是否易于学习、操作安全并能够支持患者长期自主使用,已成为影响康复机器人临床转化和推广应用的关键因素之一。基于此,本研究采用一款便携式柔性手部康复机器人,对13例脑卒中后偏瘫患者在临床及居家环境中开展连续康复训练,旨在系统评估其可用性与安全性,为柔性手部康复机器人在居家康复场景中的临床推广提供可行性依据。

## 1 对象和方法

### 1.1 对象

根据Jakob Nielsen可用性评估理论<sup>[12]</sup>,测试约5例受试者即可发现产品约85%的可用性问题。考虑到脑卒中患者在疾病阶段、功能障碍程度及个体特征方面存在较大异质性,本研究最终纳入13例脑卒中后不同恢复阶段、存在上肢运动功能障碍的患者,以全面评估设备的可用性特征。

本研究于2023年11月—2025年5月在南京医科大学第一附属医院神经内科招募住院脑卒中患者。纳入标准如下:①首次发病,符合《中国急性缺血性卒中诊治指南2023》<sup>[13]</sup>中缺血性卒中的诊断标准;②存在手功能障碍,Brunnstrom分期为I~V期;③年龄在18~85岁;④意识清楚,能配合完成评估及康复;⑤出院后计划回家继续康复。排除标准如下:①合并其他影响上肢运动功能的疾病;②合并严重的心、肝、肺、肾等疾病,可能干扰疗效和安全性评估;③患侧上肢存在明显畸形、严重疼痛或严重功能障碍;④正在参加其他上肢康复相关临床试验。本研究经南京医科大学第一附属医院伦理委员会批准(2020-SR-362),所有受试者及家属均签署知情同意书。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 治疗方法

在完成基线评估并签署知情同意后,患者先在医师的指导下接受为期2周的住院治疗。住院期间医师对患者及家属进行系统培训,教授设备的使用方法和注意事项。住院第1周,患者每日在医师的监督下完成2次机器辅助康复训练;第2周,医师仅在患者无法独立操作设备时提供必要协助。完成住院阶段训练后,对患者再次进行评估。随后,患者进入为期6周的医师远程指导下的居家康复阶段。居家训练以患者自主操作为主,每天训练2次。患者若在训练过程中出现技术或健康方面的问题,可随时通过短信或电话联系医师获取帮助。每次康复训练包括手掌抓握被动训练、手指单关节训练以及常见手势训练,持续33 min。医师可在后台查看患者的训练数据,并在随访评估时根据患者上肢运动功能恢复情况对训练内容与训练量进行适当调整。

#### 1.2.2 康复机器人

本研究采用由东南大学研制的一款仿蜂窝结构柔性手部康复机器人<sup>[14]</sup>。该机器人采用仿蜂窝结构柔性驱动器(图1),可辅助患者的掌指关节和

掌指近端关节进行屈曲和伸张动作,并分别实现超过50°和70°的活动空间。该系统重1.72 kg,具有体积小、重量轻、便于穿戴的特点,为临床和居家患者提供康复治疗。机器人基于气动驱动原理,能够实现日常生活的常见手势。在康复训练过程中,机器人系统根据医师设置的训练方案进行工作,辅助患者在立位、坐位或卧位状态进行康复训练。



图1 仿蜂窝结构气动柔性手部康复机器人

Figure 1 A soft hand rehabilitation robot utilizing honey-comb pneumatic actuators

### 1.2.3 评定方法

在干预开始前(T0)、干预2周(T1)、4周(T2)、8周结束时(T3),分别采用Fugl-Meyer运动功能量表上肢部分(Fugl-Meyer assessment upper extremity, FMA-UE)、行动研究手臂测试(action research arm test, ARAT)、日常生活活动量表(activities of daily living, ADL)评价患者的上肢运动功能和日常生活自理能力。在干预结束后,对患者或其家属进行系统可用性量表(system usability scale, SUS)<sup>[15]</sup>评估,并开展半结构式访谈以评价设备的可用性。

FMA-UE量表是评估脑卒中患者上肢运动、平衡、感觉和关节功能的综合评估工具,总分66分,得分越高表示上肢运动功能越好。针对运动功能轻度受损的慢性脑卒中患者,其最小临床重要差异(mini clinical important difference, MCID)的范围为4.25~7.25分<sup>[16]</sup>,本研究采用推荐值5.75分作为临床意义判断标准。ARAT量表主要用于评估上肢精细运动能力,包括抓、握、捏及粗大运动4个维度,共19个项目,每项得分0~3分,总分57分。对于脑卒中患者,其MCID为5.7分<sup>[17]</sup>。ADL量表用于评估个体在日常生活中自理能力的独立性,涵盖进食、穿衣、个人卫生等基本生活技能,总分100分,得分越高表示独立性越好。SUS量表用于评估系统的可

用性,一共10道题,采用LIKERT 5分量表法(从非常不同意到非常同意赋值1~5分),其中第1、3、5、7、9题为正向题,第2、4、6、8、10题为负向题。各条目在得分转换后对应0~4分,最终总分范围为0~100分,得分越高代表系统可用性越佳。半结构式访谈包括3个问题,询问患者及其家属对该设备的使用体验展开,包括设备的优点、存在的不足,以及患者认为康复设备应具备的功能。

### 1.3 统计学方法

采用SPSS 25.0统计学软件进行分析。计量资料经Shapiro-Wilk检验验证正态性,满足正态性用均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,不满足用中位数(四分位数) $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示,采用Wilcoxon符号秩检验。对临床评估量表(FMA-UE、ARAT)使用既往研究报道的MCID阈值(5.75分、5.7分)评价其临床意义。SUS量表采用描述性统计进行汇总。最后本研究分析了SUS得分与人口学数据及临床评估量表之间的潜在相关性,对于连续型变量采用Spearman相关分析,对于分类变量采用Mann-Whitney U检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 患者基本信息

本研究共纳入了13例脑卒中后上肢运动功能障碍患者,均按计划完成了8周的训练及评估。患者的一般资料见表1。

表1 患者的人口学数据

Table 1 Patient demographics

No.case	Sex	Age	Affected hand	Duration of disease(months)	Education level
1	Female	33	Left	0.6	Associate degree
2	Male	52	Right	0.3	Middle school
3	Male	55	Left	0.2	Primary school
4	Female	49	Left	12.0	High school
5	Male	52	Left	5.0	Middle school
6	Female	74	Right	0.7	Primary school
7	Male	53	Right	0.1	Middle school
8	Male	82	Right	0.2	High school
9	Female	83	Left	5.0	Middle school
10	Male	62	Left	2.0	High school
11	Male	67	Right	2.0	High school
12	Male	59	Right	0.1	Middle school
13	Female	67	Left	6.0	Middle school

### 2.2 可用性

所有患者SUS量表平均得分为(85.8±10.5)分

(图2),根据 Bangor 等<sup>[15]</sup>的分级标准,该设备的整体可用性达到“Excellent”水平。在半结构式访谈中,大多数患者认为设备易于操作、训练效果明确、便于携带,尤其对患侧手部主动活动受限的患者具有明显帮助。部分患者也提出了使用过程中的一些问题:2例患者希望“设备连接更简便”;1例患者反映“训练过程中偶见漏气”;1例患者认为“动作种类偏少”;1例患者提到“佩戴时偶有滑脱”;1例慢性期患者表示“效果不如预期”。关于对康复设备未来功能的期望:7例患者希望设备“能够更显著改善手部运动功能”;2例患者提出“增加更多的训练动作”;1例患者希望“进一步简化操作步骤”。

### 2.3 临床评估

所有患者临床评估的结果见表2,干预8周后,FMA-UE、ARAT、ADL评分均较基线显著提高( $P < 0.05$ )。经过8周的机器辅助康复,大部分患者的上

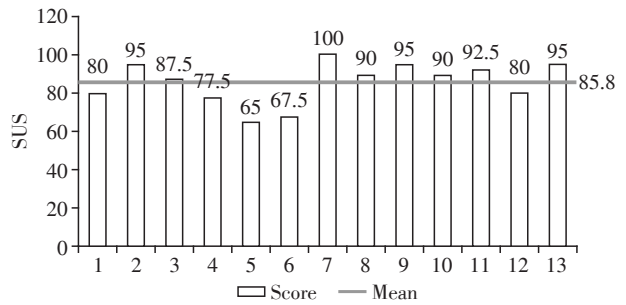


图2 患者SUS量表得分结果  
Figure 2 Individual results on SUS scale

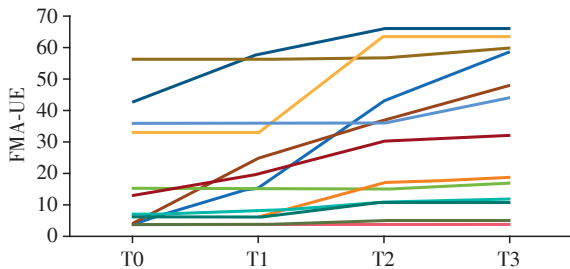
肢运动功能较基线显著改善,FMA-UE评分提高了8.0(3.0,27.0)分,13例患者中有7例8周后FMA-UE评分达到了MCID(图3),ARAT评分提高了6.0(1.0,24.5)分,8例患者ARAT评分达到了MCID(图4),部分患者的ADL评分较前改善,提高0(0,20.0)分(图5)。在整个训练期间,未报告任何严重不良事件。

表2 患者训练后FMA-UE、ARAT、ADL评分变化

Table 2 Changes in FMA-UE, ARAT, and ADL scores of patients after training [M(P<sub>25</sub>, P<sub>75</sub>)]

Variable	T0	T3	T0-T3	Z	P
FMA-UE	7.0(4.0, 34.5)	32.0(11.5, 59.5)	8.0(3.0, 27.0)	-3.061	0.002
ARAT	0(0, 30.5)	18.0(5.0, 46.0)	6.0(1.0, 24.5)	-2.937	0.003
ADL	55.0(35.0, 80.0)	80.0(47.5, 90.0)	0(0, 20.0)	-2.214	0.027

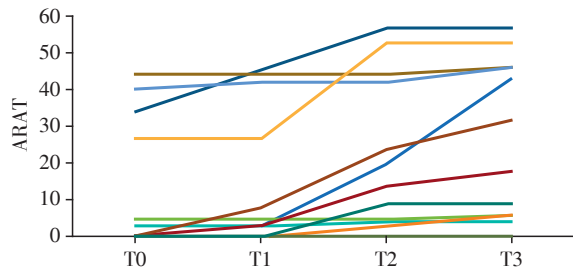
T0: before the intervention began; T3: intervention for 8 weeks.



Different colored lines represent 13 different patients. T0: before the intervention began; T1: intervention for 2 weeks; T2: intervention for 4 weeks; T3: intervention for 8 weeks.

图3 FMA-UE评分在0~8周各时间点的变化

Figure 3 Changes in FMA-UE scores at each time point from 0 to 8 weeks



Different colored lines represent 13 different patients. T0: before the intervention began; T1: intervention for 2 weeks; T2: intervention for 4 weeks; T3: intervention for 8 weeks.

图4 ARAT评分在0~8周各时间点的变化

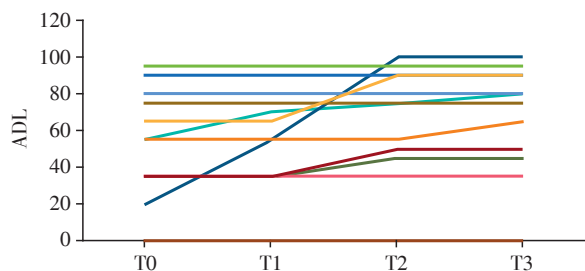
Figure 4 Changes in ARAT scores at each time point from 0 to 8 weeks

### 2.4 可用性结果与患者特征的相关性

为探讨患者个体特征对系统可用性结果的潜在影响,本研究对SUS得分与患者人口学特征及临床评估指标之间的关系进行了分析。Spearman相关分析及非参数检验结果显示,SUS得分与年龄、病程、FMA-UE、ARAT及ADL评分之间均未观察到显著相关性,不同性别患者的SUS得分差异也无统计学意义( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

本研究评估了柔性手部康复机器人在脑卒中后上肢运动功能障碍患者中的可用性,采用“2周临床训练+6周居家训练”的连续过渡模式,重点关注患者在真实使用情境下学习、使用机器康复的可行性。在系统可用性量表及半结构式访谈中,患者及家属普遍认为设备易于使用、便于携带且能够在家



Different colored lines represent 13 different patients. T0: before the intervention began; T1: intervention for 2 weeks; T2: intervention for 4 weeks; T3: intervention for 8 weeks.

图5 ADL评分在0-8周各时间点的变化

Figure 5 Changes in ADL scores at each time point from 0 to 8 weeks

庭环境中安全运行,临床评估量表也显示患者运动功能存在不同程度改善,提示该设备可作为脑卒中患者上肢康复的一种可行方案。

脑卒中后功能恢复依赖神经可塑性的重建,而重复性、任务特异性及高强度的训练是促进神经可塑性的重要途径<sup>[18]</sup>。康复机器人能够提供稳定、可重复、量化的训练,更契合神经可塑性的训练原则,因此逐渐在临床康复中得到应用<sup>[19]</sup>。目前用于脑卒中后手功能康复的机器人仍以刚性外骨骼结构为主,其通过连杆或驱动单元实现较为精确的手指运动辅助,在重复性训练和关节轨迹控制方面具有一定优势<sup>[20]</sup>。然而,刚性康复机器人普遍存在重量大、结构笨重、佩戴舒适性不足以及对不同手型和指长适配性有限等问题,从而限制了其在居家环境及日常生活活动中的应用<sup>[21]</sup>。相比之下,柔性可穿戴康复机器人在穿戴舒适性、适配性及使用便捷性方面具有潜在优势,更适合支持居家环境下的长期自主训练和功能导向训练<sup>[22]</sup>。本研究采用的机器为柔性可穿戴手部康复设备,基于气动驱动结构实现多指协同运动,在保证使用安全性的同时兼顾穿戴舒适性与适配性,适合在临床及居家环境中开展功能导向的手部训练。

中国卒中医院质量监测系统显示,2020年脑卒中患者平均住院时间仅为 $(10.700\pm 0.005)d$ <sup>[23]</sup>,出院后康复训练的强度与频率显著下降<sup>[7]</sup>。在此背景下,居家康复的重要性愈发凸显。Aguirre-Ollinger等<sup>[10]</sup>研究指出,与传统临床康复相比,居家使用机器人康复的总成本可降低24%,为高强度康复提供了一种低成本、可持续的选择。然而,目前针对“无监督或低监督”条件下居家使用康复机器人的研究仍较少,尤其缺乏对患者真实家庭环境中长期使用体验与安全性的系统评估,本研究的结果为这一

方向提供了有益证据。

与多数仅开展2~4周居家训练的研究不同<sup>[24-26]</sup>,本研究纳入患者均完成了8周的连续训练,SUS平均得分为85.8分,处于“Excellent”级别,反映了患者对设备的高度认可。虽然部分患者(如5、6号)评分偏低,但结合访谈内容分析,可能与其偏瘫程度较重、主观疗效预期较高有关。本研究未对患者的上肢运动障碍程度作限制,纳入患者基线FMA-UE和ARAT的范围较宽(4~56分及0~44分),但所有患者均能在短期培训后独立或在家属辅助下完成训练,说明该设备对不同功能水平的患者具有良好的适用性。针对患者提出的“佩戴滑脱”“偶见漏气”“训练动作较单一”等问题,设备已在研究结束后进行了相应优化,后续版本预计可进一步提升稳定性与训练丰富度。同时,患者期望增加游戏化训练形式以提高参与积极性,这也为设备后续迭代提供了方向。

需要指出的是,本研究的主要目标是评估设备的可用性而非疗效验证,受样本量和研究设计限制,无法从因果关系层面证明设备对功能恢复的独立促进作用。尽管如此,大多数患者在训练后上肢功能有所改善,其中FMA-UE量表中7例患者以及ARAT中8例患者达到了MCID,这与既往居家机器人康复研究结果一致<sup>[26-27]</sup>。Dromerick等<sup>[28]</sup>认为,强化训练对脑卒中后2~3个月的患者疗效最佳,而对病程超过6个月的患者改进有限。本研究中未达到MCID的患者中,有3例病程超过5个月,符合既往结论,但也观察到个别病程较长的患者仍有改善,提示病程并非唯一影响因素。本研究未限制患者同期接受其他康复治疗,因此上肢功能改善不能完全归因于机器人训练。此外,虽然大多数患者的运动功能有所提高,但ADL提升并不显著,这与既往研究一致,即上肢运动能力的改善并不必然转化为生活自理能力的同步提升<sup>[29]</sup>。

针对可能影响可用性结果的相关因素进行分析后,本研究结果显示,系统可用性评价未受到患者人口学特征及上肢功能水平的明显影响,患者整体对该设备表现出较高的接受度和良好的使用体验,该结果与既往相关研究报道一致<sup>[30]</sup>。上述结果提示,本研究所采用的柔性可穿戴手部康复设备在不同年龄、性别及不同上肢运动障碍程度的脑卒中患者中均具有较为稳定的可用性表现。

本研究仍存在一定局限性。首先,样本量较小,缺乏对照组,可能导致统计效力不足。其次,随访时间相对较短,尚无法评价设备长期使用的依从

性及其对功能变化的持续影响。此外,本研究未对患者同期接受的其他康复干预进行严格控制,上肢功能的变化可能受到多种因素的共同影响。未来研究可在此基础上开展随机对照试验,纳入更多样本,并延长随访周期,以进一步验证该设备在不同康复阶段中的临床疗效;此外可结合智能监测、游戏化训练及个性化训练方案,以进一步提升设备的可用性与患者的主动参与度。

综上所述,本研究表明脑卒中后偏瘫患者在经过短期培训后,可在无监督的居家环境下安全有效地使用柔性手部康复机器人开展康复训练。未来需进一步优化设备设计,简化操作流程,丰富训练模式,以提升其在家庭康复领域的应用潜力,为脑卒中患者的上肢功能恢复提供新的可行路径。

#### 利益冲突声明:

所有作者声明无利益冲突。

#### Conflict of Interests:

All authors disclose no relevant conflict of interests.

#### 作者贡献声明:

狄亚萱负责研究设计、数据收集分析、论文撰写;孙淮庆负责论文修改;严鹏负责数据整理;张蕊蕊、曹辉负责数据收集;吴婷负责论文指导。

#### Author's Contributions:

DI Yaxuan was responsible for experiment design, data analysis, and manuscript writing. SUN Huaiqing was responsible for manuscript revision. YAN Peng was responsible for data organization. ZHANG Ruihui and CAO Hui were responsible for data collection. WU Ting was responsible for manuscript guidance.

#### [参考文献]

- [1] TU W J, WANG L D, YAN F, et al. China stroke surveillance report 2021[J]. *Mil Med Res*, 2023, 10(1): 33
- [2] TU W J, ZHAO Z P, YIN P, et al. Estimated burden of stroke in China in 2020[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(3): e231455
- [3] 国家卫生健康委加强脑卒中防治工作减少百万新发残疾工程专家委员会, 吉训明. 《2024年中国脑卒中防治报告》概要[J]. *首都医科大学学报*, 2025, 46(6): 947-960  
Stroke Prevention Project, National Health Commission, JI Xunming. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2024[J]. *Journal of Capital Medical University*, 2025, 46(6): 947-960
- [4] TOLLÁR J, NAGY F, CSUTORÁS B, et al. High frequency and intensity rehabilitation in 641 subacute ischemic stroke patients [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2021, 102(1): 9-18
- [5] CHEN C, CHEN T, ZHAO N, et al. Regional maldistribution of human resources of rehabilitation institutions in China Mainland based on spatial analysis[J]. *Front Public Health*, 2022, 10: 1028235
- [6] XUE X L, YANG X W, DENG Z Y, et al. Global trends and hotspots in research on rehabilitation robots: a bibliometric analysis from 2010 to 2020 [J]. *Front Public Health*, 2021, 9: 806723
- [7] FORBRIGGER S, DEPAUL V G, DAVIES T C, et al. Home-based upper limb stroke rehabilitation mechatronics: challenges and opportunities[J]. *Biomed Eng Online*, 2023, 22(1): 67
- [8] WANG H G, GUO J L, ZHANG Y Q, et al. Closed-loop rehabilitation of upper-limb dyskinesia after stroke: from natural motion to neuronal microfluidics [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2025, 22(1): 87
- [9] PARK J M, PARK H J, YOON S Y, et al. Effects of robot-assisted therapy for upper limb rehabilitation after stroke: an umbrella review of systematic reviews [J]. *Stroke*, 2025, 56(5): 1243-1252
- [10] AGUIRRE-OLLINGER G, CHUA K S G, ONG P L, et al. Telerehabilitation using a 2-D planar arm rehabilitation robot for hemiparetic stroke: a feasibility study of clinic-to-home exergaming therapy[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 207
- [11] CHEN Y, ABEL K T, JANECEK J T, et al. Home-based technologies for stroke rehabilitation: a systematic review[J]. *Int J Med Inform*, 2019, 123: 11-22
- [12] NIELSEN J, LANDAUER T K. A mathematical model of the finding of usability problems [C]//Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems. Amsterdam: ACM, 1993: 206-213
- [13] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性缺血性卒中诊治指南2023[J]. *中华神经科杂志*, 2024, 57(6): 523-559  
Chinese Society of Neurology, Chinese Stroke Society. Chinese guidelines for diagnosis and treatment of acute ischemic stroke 2023 [J]. *Chinese Journal of Neurology*, 2024, 57(6): 523-559
- [14] LAI J W, SONG A G, WANG J J, et al. A novel soft glove utilizing honeycomb pneumatic actuators (HPAs) for assisting activities of daily living [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 3223-3233
- [15] BANGOR A, KORTUM P T, MILLER J T. Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale[J]. *J Usability Stud*, 2009, 4: 114-123

- [16] PAGE S J, FULK G D, BOYNE P. Clinically important differences for the upper-extremity Fugl-Meyer scale in people with minimal to moderate impairment due to chronic stroke[J]. *Phys Ther*, 2012, 92(6): 791-798
- [17] VAN DER LEE J H, DE GROOT V, BECKERMAN H, et al. The intra- and interrater reliability of the action research arm test: a practical test of upper extremity function in patients with stroke[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2001, 82(1): 14-19
- [18] 孙妍玉, 吴 晋. 神经网络重塑促进脑卒中后功能修复的研究进展[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(4): 577-581  
SUN Y Y, WU J. Research progress on the critical role of neural network remodeling in functional recovery after stroke[J]. *Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences)*, 2023, 43(4): 577-581
- [19] 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
- [20] SHI X Q, TI C E, LU H Y, et al. Task-oriented training by a personalized electromyography-driven soft robotic hand in chronic stroke: a randomized controlled trial[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2024, 38(8): 595-606
- [21] TOH S F M, FONG K N K, GONZALEZ P C, et al. Application of home-based wearable technologies in physical rehabilitation for stroke: a scoping review[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2023, 31: 1614-1623
- [22] BARDI E, GANDOLLA M, BRAGHIN F, et al. Upper limb soft robotic wearable devices: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1): 87
- [23] TU W J, YAN F, CHAO B H, et al. Treatment and 1-year prognosis of ischemic stroke in China in 2018: a hospital-based study from bigdata observatory platform for stroke of China[J]. *Stroke*, 2022, 53(9): e415-e417
- [24] DEVITTORI G, DINACCI D, ROMITI D, et al. Unsupervised robot-assisted rehabilitation after stroke: feasibility, effect on therapy dose, and user experience[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 52
- [25] PROIETTI T, NUCKOLS K, GRUPPER J, et al. Combining soft robotics and telerehabilitation for improving motor function after stroke[J]. *Wearable Technol*, 2024, 5: e1
- [26] GUILLÉN-CLIMENT S, GARZO A, MUÑOZ-ALCARAZ M N, et al. A usability study in patients with stroke using MERLIN, a robotic system based on serious games for upper limb rehabilitation in the home setting[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 41
- [27] TANCZAK N, PLUNKETT T K, LIN S J, et al. Feasibility of post-stroke hand rehabilitation supported by a soft robotic hand orthosis in-clinic and at-home[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2025, 22(1): 183
- [28] DROMERICK A W, GEED S, BARTH J, et al. Critical period after stroke study (CPASS): a phase II clinical trial testing an optimal time for motor recovery after stroke in humans[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2021, 118(39): e2026676118
- [29] WADDELL K J, STRUBE M J, BAILEY R R, et al. Does task-specific training improve upper limb performance in daily life poststroke? [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31(3): 290-300
- [30] GERMANOTTA M, MAURO M C, FALCHINI F, et al. A robotic rehabilitation intervention in a home setting during the COVID-19 outbreak: a feasibility pilot study in patients with stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2025, 22(1): 93
- (收稿: 2025-12-01; 修回: 2026-02-02; 录用: 2026-02-04)  
(本文编辑: 唐 震)

欢迎投稿 欢迎订閱