·临床研究·

基于用户体验蜂窝模型探讨任务导向性脑卒中上肢康复机器人训练体验的质性研究*

刘致含[1] 吴学森[1] 张景春[1] 赵宝茹[1] 何友泽[1,2] 胡雨蝶[1] 吴劲松[1,2,3]

摘要

目的：从脑卒中患者、照护者及康复治疗师多个角度收集任务导向性脑卒中上肢康复机器人的用户体验，分析其优点与不足，为进一步研发提供依据。

方法：采用质性研究方法，基于用户体验蜂窝模型，通过目的抽样法对15名脑卒中患者、9名照护者及10名康复治疗师进行半结构式访谈及体验感评分。使用Nvivo 12软件并应用Braun & Clarke的主题分析法并借助Nvivo 12软件对访谈内容分析、提炼主题。

结果：共提炼出6个主题，17个亚主题，包括有用性（肢体功能、心理状况、康复/工作效率）、可用性（操作难度、人机交互）、满意度（模块设计、元素设计、舒适度）、可寻性（信息架构、功能搜索、任务提示）、可获取（个性化、应用环境、社会支持）、可信度（专业性、准确性、安全性）。评分结果显示，受访者对“可获取”评分相对较低7.76±1.24，而其他5个主题平均分均在8分以上，且在“有用性”及“可信度”方面评分均显著高于“可获取”（P=0.029，P < 0.001）。

结论：任务导向性上肢康复机器人有较好的用户体验感，但在人机交互效率、舒适度及应用环境等方面仍需进一步优化。

关键词 用户体验蜂窝模型；脑卒中；上肢康复机器人；任务导向性训练；上肢功能障碍；质性研究

中图分类号：R743.3，R493 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-1242（2025）-04-0508-08

A qualitative study to explore the training experience of task-oriented stroke upper limb rehabilitation robot based on the user experience honeycomb model/LIU Zhihan, WU Xuesen, ZHANG Jingchun, et al.// Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2025, 40(4): 508—515

Abstract

Objective: To collect the user feedback on task-oriented upper limb rehabilitation robots from multiple perspectives, including stroke patients, caregivers and rehabilitation therapists, and to provide insights for further development and optimization by analyzing the existing deficiencies.

Method: A qualitative research method was used to conduct semi-structured interviews and experience ratings with 15 stroke patients, 9 caregivers, and 10 rehabilitation therapists in the Department of Occupational Therapy of the Rehabilitation Hospital Affiliated to Fujian University of Traditional Chinese Medicine, using purposive sampling based on the user experience honeycomb model. The interview data were analyzed and summarized to refine the themes according to Braun & Clarke's thematic analysis method and with the assistance of NVivo 12 software.

Result: Six themes and 16 sub-themes were presented, including usefulness (physical function, psychological condition and rehabilitation efficiency), usability (operational difficulty and human-machine interaction), satis-

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2025.04.005

*基金项目：中国康复医学会科技发展项目（KFKT-2023-003）；福建中医药大学青年科技创新人才培育计划（XQC2023004）；福建中医药大学重大科技创新“揭榜挂帅”专项项目（XJB2022006）

1 福建中医药大学康复医学院，福建省福州市，350000；2 福建中医药大学康复产业研究院；3 通讯作者

第一作者简介：刘致含，女，硕士研究生； 收稿日期：2024-12-03

faction(training modules, element design and comfort), findability(information architecture, functional search and task prompts), accessibility(personalization, application environment and social support), and credibility (professionalism, accuracy and safety). The scoring results showed that the score of "accessiblilty" was relatively low at 7.76±1.24, while the average score of the other five topics was above 8, and the scores of "usefulness" and "credibility" of the equipment were significantly higher than those of "accessibility"(P=0.029, P<0.001).

Conclusion: The task-oriented upper limb rehabilitation robot has a good sense of user experience. However, further improvements are needed in the efficiency, comfort and application environment of human-computer interaction machine.

Author's address Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou, Fujian, 350000

Key word user experience honeycomb; stroke; upper limb rehabilitation robot; task-oriented training; upper limb functional disorder; qualitative research

脑卒中已成为全球重大公共卫生问题,具有高致残率和高致死率的特点[1]。流行病学研究显示,近80%的患者会遗留上肢运动功能障碍[2],严重影响日常生活质量,加重家庭、社会的经济负担[3]。上肢运动功能较为精细且与日常生活活动密切相关,一直是临床康复的重点和难点[4]。脑卒中上肢康复机器人作为一种新兴的临床康复技术,已被国内外脑卒中指南推荐为常规治疗的辅助手段[5—6],其可提供重复性、高强度、可反馈的任务导向性训练[7],能够促进患者脑损伤后神经功能重塑,改善上肢运动功能[8]。

目前,国内外关于任务导向性脑卒中上肢康复机器人的研究多聚焦于其康复效果[9—10]。然而meta分析显示,上肢康复机器人的康复效果尚不理想[11]。同时,上肢康复机器人的研发对用户体验的关注度不足,尤其缺乏对直接使用机器人的脑卒中患者及操作设备的康复治疗师体验感的了解[12],限制了对设备的持续改进,影响临床使用效果[13]。Peter Morville提出的用户体验蜂窝模型(User Experience Honeycomb)是目前各个领域中广受认可的用户体验模型,揭示了用户体验要素的多元需求,它以实现“应用价值”为核心目标,由“有用性(useful)”“可用性(usable)”“满意度(desirable)”“可寻性(findable)”“可获取(accessible)”和“可信度(credible)”六个层面构成[14]。该模型可为评估任务导向性脑卒中上肢康复机器人的用户体验提供全面的理论支持,有助于揭示其潜在不足。

基于此,本研究以用户体验蜂窝模型为理论框架,采用质性研究方法,对使用过任务导向性脑卒中上肢康复机器人的患者、照护者及康复治疗师进行深入访谈,旨在从多个角度收集上肢康复机器人的使用反馈,通过质性分析其现存不足,从用户体验的角度,为上肢康复机器人的升级迭代提供依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

本研究采用目的抽样方法,于2024年5—10月在福建中医药大学附属康复医院作业治疗部对使用过任务导向性脑卒中上肢康复机器人Wisebot-X5(深圳华鹊景医疗科技有限公司)的患者、照护者及康复治疗师进行访谈。

脑卒中患者纳入标准:①符合《2019年中国各类主要脑血管疾病诊断标准》[15];②上肢无过度痉挛的单侧偏瘫(改良Ashworth量表≤2级);③脑卒中亚急性期,首次脑卒中病史,病程2周—6个月;④年龄18—80岁;⑤认知正常,蒙特利尔认知评估量表(MoCA)评分>21分。排除标准:①生命体征不稳定;②严重的单侧忽略;③严重的心肺功能障碍;④影响上肢运动功能的神经肌肉或骨关节疾病。

照护者纳入标准:①年龄≥18岁;②照顾患者的时长>患者住院时长的80%,且每次均陪伴患者进行脑卒中上肢康复机器人训练;③认知正常,有较好的沟通表达能力;④知情同意。排除标准:既往有精神疾病史。

康复治疗师的纳入标准:①拥有脑卒中上肢功能康复工作经验5年及以上;②可熟练操作脑卒中上肢康复机器人;③知情同意。

样本量以访谈饱和,不再有新信息出现为准,最

终纳入34名受访者，包括15名脑卒中患者，9名照护者以及10名康复治疗师，受访者的基本资料见表1。为保护访谈对象隐私，以编号P1—P15代表脑卒中患者，编号C1—C9代表照护者，编号R1—R10代表康复治疗师。本研究已获得福建中医药大学附属康复医院伦理委员会批准（2024KY-006-01）。

表1　受访者的基本资料　[$\bar{x}\pm s$/M(P25,P75)/n(%)]

	脑卒中患者（n=15）	照护者（n=9）	康复治疗师（n=10）
年龄（岁）	59.20±11.30	46.67±13.42	29.30±1.95
性别			
男	13(86.67)	3(33.33)	5(50.00)
女	2(13.33)	6(66.67)	5(50.00)
疾病诊断			
脑梗死	11(73.33)	—	—
脑出血	4(26.67)	—	—
学历			
小学	3(20.00)	1(11.11)	0(0.00)
初中	4(26.67)	1(11.11)	0(0.00)
中专	4(26.67)	1(11.11)	0(0.00)
高中	3(20.00)	3(33.33)	0(0.00)
大专	1(6.67)	1(11.11)	0(0.00)
本科	0(0.00)	2(22.22)	9(90.00)
硕士	0(0.00)	0(0.00)	1(10.00)
职称			
初级治疗师	—	—	4(40.00)
中级治疗师	—	—	6(60.00)
与患者关系			
子女	—	4(44.44)	—
夫妻	—	5(55.56)	—
病程时间（月）	2(1,6)	—	—
MoCA分数	23(22,28)	—	—
住院天数	21.07±5.79	—	—
每日照顾时间（h）	—	18(12,24)	—
住院陪伴天数（天）	—	19.56±7.00	—
工作年限（年）	—	—	6.80±1.48

1.2　研究方法

1.2.1　拟定访谈提纲：访谈提纲的内容由课题小组成员基于Peter Morville的用户体验蜂窝模型构建，通过小组讨论、咨询专家并进行预访谈后修改，最终形成正式访谈提纲。

脑卒中患者、照护者的访谈内容包括：①您觉得上肢康复机器人的训练效果如何？②您（患者）在进行上肢康复机器人训练时遇到过哪些问题？③您比较喜欢/不喜欢机器人的哪些方面（模块）？④机器人提供了哪些清晰的步骤指引，以帮助完成评估及复杂的任务训练？⑤您认为哪些因素可能影响您（患者）使用上肢康复机器人？⑥您如何看待上肢康复机器人训练，是否认为它是值得信任的？

康复治疗师的访谈内容包括：①您认为上肢康复机器人的临床康复效果如何？②您认为上肢康复机器人在哪些方面是需要改进的？您在操作时有遇到过哪些问题？③您对上肢康复机器人的哪些特性或功能感到满意/不满意？④您认为上肢康复机器人的页面菜单和功能布局如何？⑤您觉得哪些因素会影响患者、治疗师对于上肢康复机器人的获取？⑥您认为这款康复机器人训练效果的可信度如何？

1.2.2　资料收集方法：采用半结构式访谈法收集资料。访谈成员提前与访谈对象沟通，使其了解目的并获得知情同意后开始进行。访谈在一个安静舒适的环境中进行，采用一对一的形式，同时让受访者结合自己的实际情况、经历去谈感受和规划，并基于Peter Morville的用户体验蜂窝模型的“有用性”“可用性”“满意度”“可寻性”“可获取”和“可信度”6个层面对任务导向性脑卒中上肢康复机器人训练体验感进行“0—10分”评价，分值越高表示评价越高。

采访过程中访谈成员始终保持中立的态度，不加过多评判等感情色彩，以减少官方、不认真的回答。访谈的全过程录音，根据受访者的角色适当调整提问方式和内容，每次访谈大约持续1h。访谈结束后，通过语音转换软件，将录音转换为文字，并整理提交。访谈成员均已完成规范培训，熟悉访谈的技巧和内容。

1.2.3　资料分析方法：本研究采用了Braun & Clarke的主题分析法[16]来分析访谈内容，并借助Nvivo 12软件系统地管理与分析访谈数据，使用SPSS 26.0软件进行统计分析，计数资料采用例数[n(%)]表示，计量资料采用均值±标准差或中位数（四分位数）进行描述。组间比较采用单因素方差分析或Kruskal-Wallis秩和检验，$P<0.05$时差异具有显著性意义。

两名课题小组成员独立对转录成文本的资料反复研读，进行初始编码，编码归类、生成主题，审查提炼主题，定义并命名主题，并对有争议的地方寻求质性研究专家帮助以达成一致，最终生成研究报告。此外，为了确保研究的可信度和效度，课题小组成员邀请了部分受访者对分析结果进行了反馈，以验证结果的准确性和相关性。

2 结果

2.1 主题提炼结果

本研究共提炼出6个主题,以及17个亚主题,涉及有用性(肢体功能、心理状况、康复/工作效率)、可用性(操作难度、人机交互)、满意度(模块设计、元素设计、舒适度)、可寻性(信息架构、功能搜索、任务提示)、可获取(个性化、应用环境、社会支持)、可信度(专业性、准确性、安全性),见表2。

2.2 主题评分结果

受访者对任务导向性脑卒中上肢康复机器人训练体验感的6个主题评分结果显示,“有用性”为(8.71±0.79)分、“可用性”为(8.32±1.10)分、“满意度”为(8.38±1.00)分、“可寻性”为(8.56±1.09)分、“可获取”为(7.76±1.24)分,以及“可信度”为(8.97±

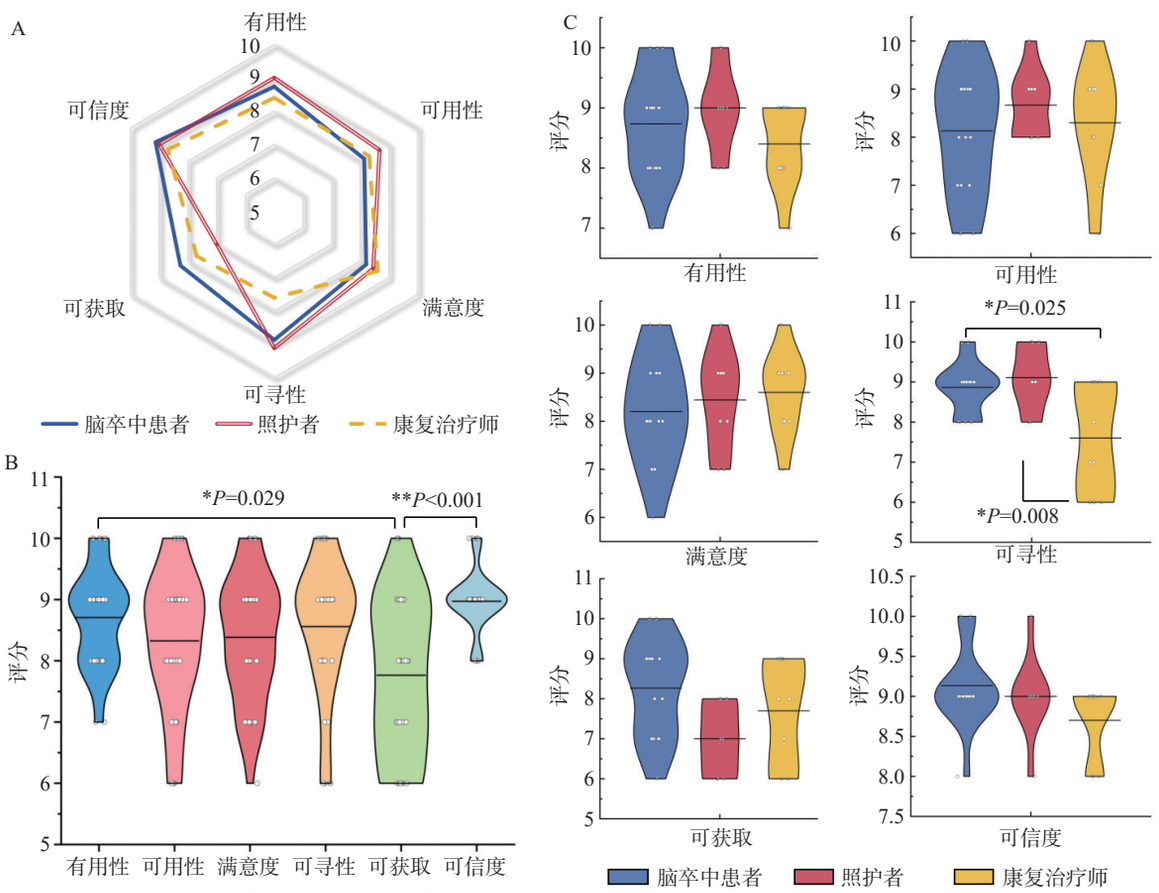
表2 任务导向性脑卒中上肢康复机器人体验感的主题提炼

主题及亚主题	代表性原始语句
有用性	
肢体功能	P8:关节没有以前僵硬了,活动更加灵活、有力气。 R3:机器人的被动训练模块可以牵伸肌肉,促进多关节活动,有助于预防肌肉挛缩。
心理状况	P6:有些训练会出现‘太棒了’类似的话语,让我更有信心、有动力地完成训练。 C2:我妈妈经常和我分享机器人训练过程中有趣的经历,……她心情一天比一天好。
康复/工作效率	P4:上个医院没有这个,恢复的效果好像也没这么快,这个是有效的。 R1:患者的治疗效率提高了,我们的工作压力也比以前小,对于我们和患者都是有利的。
可用性	
操作难度	P10:这个手臂有点重,对于我年龄这么大的人来说太费力了,在抬手做任务时很困难。 R8:(操作过程)还可以,不算简单也不算很复杂,就正常。
人机交互	P2:刚开始我是被动地带动肢体,后面会让我自己主动发力,机械带动我的力量会变小。 R6:在镜像训练模式下,可以识别患者健侧动作来带动患侧,但是识别有点延迟。 R1:机器人的助力是不能调整的,比如说它固定是50%,那它不能调整为70%或者25%。
满意度	
模块设计	C6:很满意里面的辅助训练,我爸生病后喜欢偷懒,通过辅助带动去主动训练,恢复效果也更好。 R7:我比较喜欢评估模块,可以将评估结果数据化,而且比人工评估更加精简,临床实用性很高。 R9:(机器人)评估完之后,会根据患者的情况制定不同的训练任务,更具针对性。
元素设计	C3:里面有些图案觉得是不是太幼稚了,其实我们使用的(人群)更多都是成年人了。 R5:游戏还是丰富的,新入院的患者会对这个感兴趣,但病程较长的患者会觉得有点腻。
舒适度	P5:(座椅)太硬了,坐久了或者用的力气比较大就会难受。 C4:舒适度差一点,因为它是纯金属的设备,训练会有点硌手。 R10:在某些复杂动作的训练中,机器人有时会显得不够灵活,有点卡顿。
可寻性	
信息架构	C9:我看页面显示还是很清晰的,(架构)也有层次,医生操作挺快。 R8:页面设计直观,有评估、训练模块,模块下有详细的子选项,能较快地找到想要的功能。
功能搜索	R6:我希望能增加一个搜索界面,比如提供常见的搜索建议或最近使用的功能列表。
任务提示	P13:我的视力并不好,游戏的提示音、指导语设置都对我很有用。 R9:提供了详细的步骤指引,在评估关节活动度时,系统会引导患者完成每一个动作。
可获取	
个性化	P15:身高、体型都会影响使用,但是医生都会根据我们的身高去调整机械手臂的高度。 R3:训练模式能实现个性化,软瘫期的患者以主被动训练为主,三期以上以主动模式为主。
应用环境	P1:想做这个康复机器人训练,那就只能来医院。 C7:希望在社区也能有这样的机器人,让更多的人享受高质量的康复服务。 R10:社区就有点困难了,毕竟购置成本高,一般社区是承受不起的。
社会支持	P5:家庭支持和鼓励很重要。如果家人能够支持并帮助我进行训练,我会更有动力坚持下去。 P7:病友们经常一起聊天交流心得,他们的推荐和反馈让我更有动力。
可信度	
专业性	P12:这肯定需要医学知识支持,不然也不会让我们去做这个训练。 R5:我对康复机器人训练效果的可信度持积极态度,仍需更多的临床数据来进一步验证。
准确性	R9:能够精准地记录患者的运动参数,评估结果和我们人工评的差不多,感觉还是可信的。
安全性	P11:机器上有停止键,训练时不舒服的时候可以找医生按停,防止自己受伤。 R4:训练时都会有治疗师在大厅,安全性较高,但对于无法反馈疼痛的患者,安全措施有待提高。

注:P:脑卒中患者,C:照护者,R:康复治疗师。

0.51）。6个主题评分比较分析显示，在“有用性”及“可信度”方面显著高于“可获取”，差异均有显著性意义（P=0.029，P < 0.001），“可用性”“满意度”“可寻性”评分差异均无显著性意义（P>0.05）。脑卒中患者、照护者及康复治疗师三组受访者的组间比较结果显示，康复治疗师在“可寻性”方面的评分显著低于脑卒中患者和照护者（P=0.025，P=0.008），而在“有用性”“可用性”“满意度”“可获取”“可信度”评分组间差异均无显著性意义（P>0.05）。评分见图1。

图1　基于用户体验蜂窝模型的受访者评分情况



注：A 受访者基于用户体验蜂窝模型对设备6个主题评分情况雷达图；B 所有受访者对设备6个主题的评分比较；C 脑卒中患者、照护者、康复治疗师三组对设备6个主题评分的组间比较。

3　讨论

本研究基于用户体验蜂窝模型通过半结构式访谈从脑卒中患者及其照护者、康复治疗师的角度收集了对任务导向性脑卒中上肢康复机器人的使用反馈。通过分析访谈结果，本研究发现使用者在设备“有用性”及“可信度”方面的反馈优于“可获取”方面，并且康复治疗师对设备的“可寻性”存在需求。

本研究结果发现，脑卒中患者及其照护者、康复治疗师在设备的“有用性”及“可信度”方面均评价较高，提示使用者对任务导向性脑卒中上肢机器人的训练效果较为满意。三组受访者提到上肢康复机器人训练有助于改善肢体功能，并改善负性情绪症状，而这一结果也与前期的临床定量研究发现相一致，即任务导向的上肢康复机器人训练显著提高了脑卒中患者上肢Fugl-Meyer量表（提高10.38分）、改良Barthel指数评分（提高18.38分），均显著高于最小临床差异值[7]。前人其他研究也指出，上肢康复机器人任务导向性训练能够降低脑卒中患者的肌张

力、改善肩部、肘部的关节活动度、提升手部的灵活性与握力,并在降低抑郁水平方面具有明显优势[17—18]。此外,康复治疗师对任务导向性上肢康复机器人的“有用性”给予肯定,也得益于机器人在提高工作效率、减轻工作负担方面发挥了积极作用。既往研究也指出,上肢康复机器人可在一定程度上减少医务人员的工作量,使其更好地调配医疗资源,让更多患者得到康复治疗机会[19]。因此,未来应充分合理利用上肢康复机器人的这些优势,使更多的脑卒中患者和医务人员获益。

在“可信度”方面,任务导向性脑卒中上肢康复机器人研发的专业性及训练的安全性,构成了影响受访者对其信任度评价的核心要素。上肢康复机器人研发遵循脑卒中康复的专业理论,评估及训练流程科学规范,其展现的高度专业性得到使用者的认可。其次,在设备安全性方面,尽管当前康复机器人普遍被认为具有较高的安全性,但大多依赖于设备外部的紧急停止按钮或人员的实时监控来确保安全。而对于感觉功能受损无法反馈疼痛信息的患者,其安全性有待进一步改进。研究发现,设计客观、自动化的训练监测技术,可有助于提高康复机器人的安全性。如有研究设计基于受损肢体实时物理状态的安全监督模糊控制器,根据提取的受损肢体位置和速度跟踪误差特征,有效检测患者突然的痉挛或抽搐等紧急情况,并快速停止机器人运行[20]。因此,未来亟需康复医学专家与康复工程师紧密合作,优化上肢康复机器人安全监测方法,确保患者训练时的安全性,提高其对康复机器人训练的可信度。

在“可获取”方面,受访者的总体评价较低,脑卒中患者、照护者及康复治疗师一致表达了对社区增设此类康复机器人的期望,但同时,其也指出任务导向性脑卒中上肢康复机器人在应用环境上存在限制。如上肢康复机器人制造成本较高、基层康复机器人技术服务能力不足等问题,阻碍了康复机器人在社区的应用。对此,新技术的应用如3D打印技术优化结构设计、复杂结构一体化成型技术、碳纤维复合材料的创新等,有助于实现机器人轻量化,降低制造成本[21—22]。同时,针对基层康复机器人技术服务能力不足的问题,通过建立医院-社区层级联动机制,增强远程康复机器人训练培训,也有助于基层康复机器人服务质量的提升[23—24]。借助智能化、信息化的远程康复平台,医院专家团队能够获取并分析社区康复机器人远程传输的患者评估与训练数据,实现对患者康复进展的精准监控与深入了解,及时调整和优化训练方案[25],确保其康复更加精准、有效。因此,未来应更注重研发低成本、轻量化的社区康复机器人,同时应用远程康复信息化技术,使更多基层的脑卒中患者能够受益于高效、便捷的康复服务。

在“可寻性”方面,脑卒中患者和照护者评价均显著高于康复治疗师。脑卒中患者和照护者积极反馈主要源于任务引导性脑卒中上肢康复机器人的两大优势:一是功能模块的信息架构清晰合理,层次分明,使得操作者能够快速访问评估和训练模块,从而节省了患者、照护者的等待时间;二是任务提示功能具有良好的引导性,通过视觉和听觉的双重指引,患者能够更准确地理解和执行康复任务。然而,康复治疗师的评价较低,主要问题在于功能搜索的直观性不足。对于需要频繁访问不同功能模块的康复治疗师来说,当前的搜索功能尚不够高效,影响了他们的使用体验。因此,为了进一步提升操作者在检索特定功能时的效率,未来的研发工作应考虑提供常用搜索建议及最近使用功能列表等辅助功能,增强搜索界面的直观性。

在“可用性”方面,受访者较多地提到任务导向性上肢康复机器人的人机交互功能,并指出在识别速度和助力强度方面仍有改进的空间。良好的人机交互机制不应仅限于设备对指令的被动接收,而应具备主动理解并预测使用者行为意图的能力,以适时提供必要的辅助[26]。前人研究显示[27],解码肌电、脑电、眼动等多模态人体生理电信号,可提升对使用者运动意图的捕捉精度,使机器人能够快速且精准的响应,辅助完成自然流畅的运动,提升人机交互的即时响应性。其次,在助力强度方面需进一步优化。通过引入基于自适应控制算法的按需辅助控制策略,可根据患者功能的康复进展实时调整辅助强度[28],确保患者在训练过程中得到最合适的辅助。在未来研发中,建议融合生机电技术以主动识别患者意图并即时响应;同时优化按需辅助控制算法,使机器人在重复性康复训练中自适应调整控制参数,从而提供更为个性化、智能化的辅助,提升患者的人

机交互体验。

在“满意度”方面，三组受访者一致对任务导向性脑卒中上肢康复机器人的模块设计表示满意，尤其肯定了评估模块的数据化记录功能，以及根据功能评估结果自动生成个性化训练方案的临床实用性。但照护者和康复治疗师也指出了上肢康复机器人在任务元素设计及舒适度方面存在的问题，如任务设计图案偏幼稚化、缺乏趣味性，以及机械臂材质、柔顺度欠缺导致的舒适度不佳。前人的研究发现，引入虚拟现实、脑机接口技术，并定期更新训练的游戏任务，可提高患者的自我效能感和训练的积极性[29—30]。同时，优化机械臂材质，选用柔性材料减少与皮肤的摩擦[31]，有助于提升患者训练时的舒适度。对于柔顺度不足的问题，有学者提出了一种基于受力信息精准获取与改进力位混合控制算法的创新柔顺控制技术[32]。该技术通过对机器人末端力传感器实施零点补偿及负载重力补偿措施，结合矩阵变换技术，能实时精确地计算出装配接触点上机器人末端执行器所承受的实际力值，并在力控制过程中引入双曲正切速度-力关系模型，以指导机器人的运动，可有效减少机器人在训练过程中的抖动与卡顿现象，提升训练过程中的柔顺性与稳定性。因此，应综合考虑任务设计的趣味性、机械臂材质的优化以及柔顺控制技术的创新应用，提升患者的训练积极性和舒适度体验。

4 结论

本研究基于用户体验蜂窝模型，从脑卒中患者、照护者，以及康复治疗师角度探讨任务导向性上肢康复机器人的用户体验。结果表明，其在改善患者肢体功能、提高康复治疗师工作效率方面体验感较好，但是在人机交互效率、舒适度，以及基层环境的应用方面仍需优化。

参考文献

[1] Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980—2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet, 2018, 392(10159):1736—1788.

[2] Lawrence ES, Coshall C, Dundas R, et al. Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multiethnic population[J]. Stroke, 2001, 32(6): 1279—1284.

[3] Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990—2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. Lancet Neurol, 2024, 23(10):973—1003.

[4] Pollock A, St GB, Fenton M, et al. Top 10 research priorities relating to life after stroke--consensus from stroke survivors, caregivers, and health professionals[J]. Int J Stroke, 2014, 9(3):313—320.

[5] 中国中医药信息学会抗衰老分会. 物理技术辅助脑卒中康复的临床指南[J]. 国际生物医学工程杂志, 2019, 42(2):100—108.

[6] Sall J, Eapen BC, Tran JE, et al. The management of stroke rehabilitation: a synopsis of the 2019 U.S. Department of Veterans Affairs and U.S. Department of Defense Clinical Practice Guideline[J]. Ann Intern Med, 2019, 171(12):916—924.

[7] He YZ, Huang ZM, Deng HY, et al. Feasibility, safety, and efficacy of task-oriented mirrored robotic training on upper-limb functions and activities of daily living in subacute poststroke patients: a pilot study[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2023, 59(6):660—668.

[8] Mauro MC, Fasano A, Germanotta M, et al. Restoring of interhemispheric symmetry in patients with stroke following bilateral or unilateral robot-assisted upper-limb rehabilitation: A pilot randomized controlled trial[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32:3590—3602.

[9] Shi XQ, Ti CE, Lu HY, 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.

[10] Li Y, Lian Y, Chen X, et al. Effect of task-oriented training assisted by force feedback hand rehabilitation robot on finger grasping function in stroke patients with hemiplegia: a randomised controlled trial[J]. J Neuroeng Rehabil, 2024, 21(1):77.

[11] Chien WT, Chong YY, Tse MK, et al. Robot-assisted therapy for upper-limb rehabilitation in subacute stroke patients: A systematic review and meta-analysis[J]. Brain Behav, 2020, 10(8):e1742.

[12] Radziwill NM. Designing for situation awareness: an approach to user-centered design, second edition[J]. Quality Management Journal, 2017, 24(2):56.

[13] Redström J. Towards user design? On the shift from object to user as the subject of design[J]. Design Studies, 2006, 27(2):123—139.

[14] 钱枫嫣，范建华. 基于用户体验蜂窝模型的MOOC学习APP

体验优化研究[J]. 软件导刊，2019，18(2)：110—114.
[15] 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. 中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J]. 中华神经科杂志，2019，52(9)：710—715.
[16] Braun V，Clarke V. Using thematic analysis in psychology [J]. Qualitative Research in Psychology，2006，3(2)：77—101.
[17] Adomaviciene A，Daunoraviciene K，Kubilius R，et al. Influence of new technologies on post-stroke rehabilitation：a comparison of armeo spring to the kinect system[J]. Medicina（Kaunas），2019，55(4)：98.
[18] Taravati S，Capaci K，Uzumcugil H，et al. Evaluation of an upper limb robotic rehabilitation program on motor functions，quality of life，cognition，and emotional status in patients with stroke：a randomized controlled study[J]. Neurol Sci，2022，43(2)：1177—1188.
[19] 王付涛,常立国,吕运良,等. 基于康复机器人技术的脑卒中后偏瘫上肢功能及生活能力训练的研究进展[J]. 上海医药，2024，45(13)：44—47.
[20] Pan L，Song A，Xu G，et al. Safety supervisory strategy for an upper-limb rehabilitation robot based on impedance control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems，2013，10(2)：127.
[21] 陈宏伟,刘岗,王晓伟,等. 轻量化复合材料与3D打印技术在服务机器人上的应用与展望[J]. 工程研究:跨学科视野中的工程，2022，14(1)：30—39.
[22] Zhu Y，Guo S，Ravichandran D，et al. 3D-printed polymeric biomaterials for health applications[J]. Adv Healthc Mater，2025，14(1)：e2402571.
[23] 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.
[24] Cramer SC，Dodakian L，Le V，et al. Efficacy of home-based telerehabilitation vs in-clinic therapy for adults after stroke：a randomized clinical trial[J]. JAMA Neurol，2019，76(9)：1079—1087.
[25] Pitliya A，Siddiq AB，Oli D，et al. Telerehabilitation in post-stroke care：a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Top Stroke Rehabil，2024：doi：10.1080/10749357.2024.2392439.
[26] Guo B，Li Z，Huang M，et al. Patient's healthy-limb motion characteristic-based assist-as-needed control strategy for upper-limb rehabilitation robots[J]. Sensors（Basel），2024，24(7)：2082.
[27] 侯增广,赵新刚,程龙,等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展[J]. 自动化学报，2016，42(12)：1765—1779.
[28] Pareek S，Nisar HJ，Kesavadas T. AR3n：A reinforcement learning-based assist-as-needed controller for robotic rehabilitation[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine，2024，31(3)：74—82.
[29] Long Y，Ouyang RG，Zhang JQ. Effects of virtual reality training on occupational performance and self-efficacy of patients with stroke：a randomized controlled trial[J]. J Neuroeng Rehabil，2020，17(1)：150.
[30] Said RR，Heyat M，Song K，et al. A systematic review of virtual reality and robot therapy as recent rehabilitation technologies using EEG-Brain-Computer interface based on movement-related cortical potentials[J]. Biosensors（Basel），2022，12(12)：1134.
[31] 王成军,亓杨杰. 软体机器人在医学领域的应用[J]. 中国医学物理学杂志，2022，39(7)：898—906.
[32] 喻洋,王耀兵,魏世民,等. 基于柔顺控制的机器人装配技术[J]. 北京邮电大学学报，2020，43(4)：1—6.