

· 科研综述 ·

机器人在脑卒中后运动障碍病人早期康复训练中应用的研究进展



周 霜,张桂娟*

暨南大学护理学院,广东 510632

Research progress on the application of robots in early rehabilitation training of patients with movement disorders after stroke

ZHOU Shuang, ZHANG Guijuan

School of Nursing, Jinan University, Guangdong 510632 China

Corresponding Author ZHANG Guijuan, E-mail: 2651674744@qq.com

Keywords cerebral stroke; robot; movement disorders; rehabilitation; review

摘要 对脑卒中后运动障碍概述、机器人分类、机器人辅助早期康复训练在脑卒中后运动障碍病人中的应用以及机器人在脑卒中后运动障碍病人早期康复训练中的不足与改进方向进行综述,以期为更好地改善病人运动功能、提高病人康复效果和生活质量提供参考。

关键词 脑卒中;机器人;运动功能障碍;康复;综述

doi:10.12102/j.issn.1009-6493.2024.08.021

脑卒中是一种急性脑血管疾病,是我国导致成人死亡和长期残疾的首要原因^[1]。尽管大部分脑卒中病人受损脑神经得到不同程度的修复,仍有67%的脑卒中病人遗留不同程度的运动功能障碍,严重影响病人的日常生活能力,给家庭造成沉重负担^[2-3]。因此,帮助脑卒中病人尽早恢复肢体运动功能非常重要,脑卒中早期康复是目前降低致残率的有效手段^[4]。传统早期康复训练可在一定程度上恢复病人的运动功能,但存在治疗周期长、训练内容枯燥、互动性差、病人常出现消极情绪,从而影响康复效果^[5-6]。但随着医学技术不断发展,康复机器人有非常广泛的应用前景,有研究表明,机器人辅助训练不仅可以促进病人运动功能的改善,还可以针对不同康复时期的病人提供个体化、差异化的高质量训练,定量评估和调整病人运动的各项参数,同时也增添趣味性,提高病人积极性,进而提高康复效果^[7-8]。

1 概述

运动功能障碍是脑卒中最常见的并发症,通常表现为不自主运动、肌张力障碍、协调运动异常。研究表明,1%~4%的脑卒中后病人出现不自主运动,20%的脑卒中后病人会出现肌张力障碍^[9]。46%脑卒中后病人运动障碍一般出现在脑卒中后7 d内,缺血性脑卒中后病人在不到1个月时间会出现运动障碍,出血性脑卒中后病人在6个月后会运动障碍^[10]。目前,随着我国快速康复理念的兴起,对脑卒中后运动障碍病人的康复主要强调早期干预。传统的康复疗法包括按摩、针灸、物理疗法和电刺激,已广泛用于临床实践,但超过50%的脑卒中后病人在接受常规康复治疗后仍会出现不同程度的运动功能障碍,无法满足病人的实际需求,需要在常规康复治疗的基础上,开发全新的智能康复平台,帮助病人进行准确、有效的康复训练^[11-12]。

2 康复机器人分类

2.1 根据控制性质分类

2.1.1 基于末端执行器机器人

基于末端执行器系统是连接到四肢远端部分的机器人系统,通常由手柄、前臂支架或踏板实现,通过对脑卒中病人的受损肢体运动远端进行支撑或模拟步态

作者简介 周霜,硕士研究生在读

***通讯作者** 张桂娟, E-mail: 2651674744@qq.com

引用信息 周霜,张桂娟.机器人在脑卒中后运动障碍病人早期康复训练中应用的研究进展[J].护理研究,2024,38(8):1428-1432.

训练,根据设定的运动轨迹辅助失去功能的肢体进行主动或被动训练^[13]。上肢康复机器人中具有代表性的是 1991 年美国麻省理工学院开发的 MIT-MANUS 机器人,采用五连杆平行驱动选择性顺应装配机器人手臂(SCARA),对病人的肩、肘关节进行康复训练^[14]。下肢康复机器人中,如德国 LokoHelp 下肢步行姿势训练系统^[15],在足部用绑带将运动踏板绑定,在运动踏板的带动下模拟正常步态训练。

2.1.2 基于外骨骼机器人

此类机器人基于人机工程学和仿生原理,根据人体上下肢各关节运动机制进行设计,将机械结构穿戴在功能障碍的肢体上,带动患肢进行主动和被动训练^[16]。上肢康复机器人中,如瑞士苏黎世联邦理工学院研发的 ARMin 上肢外骨骼康复机器人^[17],由最初的 4 个主动自由度转变为后面的 7 个自由度,除了对肩、肘、腕关节进行训练,还增加了针对手部训练的模式。下肢康复机器人中最典型的是 1999 年瑞士 Hocoma 公司研制的 Lokomat 步态康复训练系统,由跑步机、体重支撑系统和 2 条机械腿组成,协助髋关节和膝关节在矢状面上进行运动^[18]。

2.2 根据技术原理不同分类

2.2.1 基于虚拟现实的康复机器人

虚拟现实是由计算机创建和体验的计算机数字拟真环境,可以根据用户的理念提供更多沉浸式的互动和个性化的场景,为病人提供视、听、触觉的感官刺激,进一步反馈给大脑,从而使病人有不同的训练体验,依赖于人体感官反馈^[19]。虚拟现实技术可以为脑卒中病人提供个性化治疗,具有高度重复的任务特定动作、特定反馈,弥补传统康复训练反馈不足和任务导向不足的缺点^[20]。通过虚拟现实技术,病人可以运用特定的机器人康复设备在模拟的环境中进行患肢主动或被动训练,从而更精准地训练患肢。Jonna 等^[21]结合虚拟现实研发了 6-DOF 康复机器人系统,通过设计虚拟游戏,增加训练的趣味性,协助患肢进行肩肘关节的复合运动。下肢康复机器人中,如清华大学设计的将虚拟现实与健身车结合组成的下肢康复训练,包括主动、被动、辅助、抵抗 4 种运动形式,通过骑行的方式对运动障碍的下肢进行训练^[22]。

2.2.2 基于脑机接口的康复机器人

脑机接口使用神经电信号的调制控制外部设备,通过分析大脑活动的变化,可以将用户的意图转化为通常提供某种形式的感官反馈的数字设备或工具的控制命令,依赖于人体生物电的物理结构^[23]。2014 年,加

拿大西蒙弗雷泽大学将可穿戴的便携式机械臂系统集成无线脑机接口技术和功能性电刺激,帮助病人独立完成饮用一杯水^[24]。韩国高丽大学和德国柏林工业大学合作研发了在下肢外骨骼使用的脑机接口,通过 5 个特定闪烁频率的 LED 对大脑进行视觉刺激,产生信号,将刺激诱发电位获得相应编码技术,从而获得 5 个特定刺激下所执行的相应命令^[25]。

3 机器人辅助早期康复训练在脑卒中后运动障碍病人中的应用

3.1 肩部功能训练

脑卒中后上肢功能障碍导致的瘫痪肢体肌无力可使肩关节稳定性下降,易造成半脱位和肩部疼痛,降低病人生活质量。脑卒中后肩痛是上肢运动障碍中常见并发症之一,常发生于脑卒中后 2~3 个月,导致上肢活动、保持躯干平衡和进行日常生活活动困难,进一步阻碍上肢功能恢复^[26]。因此,对偏瘫的肩关节进行细致化训练是必要的。近年来,基于机器人的康复治疗一直受到关注,可以减轻护理人员的负担,并提出足够的康复训练量,对脑卒中后病人肩痛有明显的改善效果^[27]。苏鹏等^[28]将 43 例病程不超过 6 个月病人分为对照组和机器人训练组,前者进行以上肢粗大和精细运动训练为主的常规上肢康复训练,后者在常规训练基础上加以上肢康复机器人训练,每周 5 次,训练 4 周,结果发现机器人训练组肩部疼痛缓解,肩关节前屈 45°与 90°的角度差绝对值较对照组明显减少。金媛媛等^[29]将 40 例病程 1~4 个月的脑卒中病人分别接受常规训练(对照组)和常规训练+上肢机器人训练(观察组),每次训练 40 min,每天 2 次,每周 5 d,持续 4 周,研究发现观察组在肩关节内外旋 30°、60°主动运动角度与参考角度的相关性值、平均轨迹误差均低于对照组, P300 潜伏期及测试执行时间均短于对照组。以上研究通过上肢康复机器人训练可以进行高重复性运动,刺激病人神经功能的恢复,帮助病人重建正确的运动模式,促进病人肩关节本体感觉改善,提高病人的上肢功能,但训练时间较短,大多只在干预期间取得良好效果,对病人后续的康复效果尚未得知,有待进一步通过延长干预时间、重复测量干预指标观察康复效果。

3.2 手功能训练

手部功能障碍是脑卒中后幸存者严重的运动功能障碍,对生活独立性和日常生活活动能力产生巨大影响^[30]。脑卒中后病人的传统手部功能康复是基于集中运动和耗时的治疗,目前机器人辅助训练装置在重复训练和强化运动方面比传统手动疗法有显著效果。李

莹华^[31]将病程 ≤ 6 个月的44例脑卒中偏瘫病人分为试验组和对照组,试验组接受40 min常规上肢康复训练+力反馈手部康复机器人辅助的任务导向性训练20 min,对照组接受40 min常规上肢康复训练+治疗师辅助的任务导向性训练20 min,两组训练每日1次,每周5 d,干预4周,结果发现力反馈康复机器人辅助下的任务导向性训练可以改善脑卒中偏瘫病人手指抓握和伸屈功能。Trompetto等^[32]使用机械手对亚急性脑卒中病人进行特定任务训练可以缓解病人手指痉挛和伸屈功能,与Coskunsu等^[33]研究结果不一致,可能与受试对象不同有关,急性期病人症状不稳定,阻碍大脑的可塑性重组,进而限制功能恢复。基于脑机接口控制的软机器人比单独的机器人效果显著,在康复过程中移动顺畅且灵活,使手指精细动作更协调,但对于中度和重度手指屈伸效果不显著^[34-35]。也有研究发现,手指功能的训练可以积极转化为近端手臂功能的恢复,一项随机对照试验研究结果表明,与常规神经治疗比较,使用ReHapticKnob触觉设备的机器人辅助神经认知治疗能更好地促进手臂功能的恢复^[36]。对于是否能够长期改善病人的手功能,有待进一步随访观察干预效果。

3.3 步行功能训练

脑卒中后病人行走常具有不对称性和不稳定性,早期、高强度和重复性的步态训练可以改善预后,而机器人可以使脑卒中后病人早期进行持续性的步行训练,促进下肢功能的进一步恢复^[37]。Tomida等^[38]将26例原发性脑卒中偏瘫病人随机分为使用步态运动辅助机器人(GEAR)的干预组和进行常规康复训练的对照组,分别在入院时、干预期间(4周)、干预开始后8周和出院时评估病人功能独立性测量(FIM)步行评分的改善效率,发现使用GEAR干预组在改善步行方面明显优于对照组,且在干预期间评分最高,在8周后和出院时两组无显著差异。Yeung等^[39]研究表明,亚急性脑卒中幸存者在地面和楼梯上接受常规训练并结合20次机器人辅助训练在步态独立性和行走速度方面显著改善。以上研究表明,早期应用下肢康复机器人训练可以在一定程度上对脑卒中病人下肢运动功能具有良好效果。而也有研究发现在改善脑卒中病人的运动能力方面,机器人辅助步态训练比常规步行训练干预效果并不显著^[40]。这可能与训练时间、训练方式、治疗师的经验有关系,以后还需要更多的研究来验证机器人辅助步态训练对病人步行能力方面的干预效果。

3.4 平衡功能训练

平衡能力与脑卒中后病人下肢运动功能恢复和跌倒风险是否增加密切相关。平衡功能的恢复大多数依赖于步行训练。脑卒中早期病人应用机器人辅助训练后,病人的平衡功能有所提高。Rojek等^[41]对44例缺血性脑卒中病人分别进行Ekso GT外骨骼步态训练(试验组)和传统康复训练(对照组),每周训练5次,持续4周,结果表明,干预4周内试验组步行时间明显增加,且肢体平衡的改善优于对照组。此外,特定的平衡训练也可以起到相同作用,Inoue等^[42]将60例亚急性脑卒中病人随机分为观察组和对照组,观察组为平衡运动辅助机器人结合常规住院康复训练,对照组为仅进行常规住院康复训练,在干预前、干预2周、干预后2周随访时进行评估,结果发现使用平衡运动辅助机器人与常规住院康复训练相结合进行的平衡练习与常规康复训练对比,明显可以改善亚急性脑卒中病人的平衡能力。但在测量平衡功能方面,多数研究对病人平衡功能是否改善都是基于Berg平衡量表评估,缺乏客观的测量工具,对平衡功能测量工具的开发仍有待进一步研究。

4 机器人在脑卒中后运动障碍病人早期康复训练中应用的不足与改进方向

目前,对于上下肢运动障碍病人康复训练机器人的研究较多,对其不足与改进的方面主要集中在病人与机器人实现良好交互和机器人在远程康复的应用。1)病人与机器人实现良好交互方面。影响人机交互的关键因素是病人对机器人的信任度,即病人对系统实现其目标的依赖程度。目前机器人在脑卒中病人运动康复中应用的最大缺点是机械化执行训练任务,忽视病人的体验感受。一项对长期康复的脑卒中病人访谈研究发现,人形机器人,如社交辅助机器人提高了病人对康复活动的满意度,病人手部运动功能康复效果较好^[43]。这种基于人形机器人技术实施辅助康复治疗,可以实现类似于人与病人互动的场景,但仅倾向于包括信息提供、反馈和关系相关的治疗互动,由病人本人或治疗师进行主动或被动训练,很少开展机器人可以同时发挥辅助训练和与病人实现互动的研究。2)机器人在远程康复的应用方面。目前脑卒中后运动障碍病人的康复训练主要在院内进行,因其成本和技术的复杂性很少在家庭中开展。远程康复对病人而言是一种方便、容易获得的一种方式,将康复训练机器人与远程通信设备结合使用,可以监控远程状态下病人的运动训练和获取运动指标数据,根据数据反馈做出及时调

整,保证医护人员和病人信息交流的及时性。Nam 等^[44]对脑卒中病人在家中进行由脑电图驱动的手腕外骨骼机器人辅助上肢训练,每周 3~5 次,每次 60 min,康复治疗师通过智能手机开发的应用程序对病人实时监测,可以有效改善患侧上肢的运动功能。远程机器人辅助康复训练可以弥补传统家庭康复的劣势,可以提供客观的训练数据和反馈结果,给病人带来便利的同时又节省医疗费用的成本,但对病人特殊情况的处理存在一定的缺陷,未来可以在远程机器人康复的同时,添加对病人生理评估的模块。

5 小结

早期康复训练对脑卒中后运动障碍病人是否能够重返运动和生活具有重大意义。机器人辅助早期康复训练可以有效提高脑卒中后病人运动功能,在肩部功能训练、手功能训练、步行功能训练、平衡功能训练等方面有明显的改善效果。但随着医学科技的发展,机器人需要在各方面、多层次提升服务质量,亟须采取其他辅助技术实现病人与机器人良好交互,提高病人对机器人康复训练的满意度和信任度,同时将机器人和远程康复平台有机结合,加强居家康复监测管理,进一步提高康复效果,降低致残率,更好地帮助病人提高生活质量,回归家庭和社会。

参考文献:

- [1] 刘乐,余超,廖逸文,等.1990—2019 年中国缺血性脑卒中疾病负担变化分析[J].中国循证医学杂志,2022,22(9):993-998.
- [2] LIN P J, JIA T Y, LI C, *et al.* CNN-based prognosis of BCI rehabilitation using EEG from first session BCI training[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021, 29:1936-1943.
- [3] 张欣,郭婷婷,王玉洁.顶叶脑卒中与运动系统功能障碍[J].中华老年心脑血管病杂志,2019,21(8):891-892.
- [4] 陈煌,谢红珍,黎蔚华,等.脑卒中肢体功能障碍患者早期康复护理的最佳证据总结[J].解放军护理杂志,2020,37(6):6-10.
- [5] 刘书轩,邱鹏,聂永琦,等.虚拟现实在脑卒中患者运动功能康复中的应用[J].计算机工程与应用,2021,57(21):68-79.
- [6] WORANUSH W, MOSKOPP M L, SEDGHI A, *et al.* Preventive approaches for post-stroke depression: where do we stand? A systematic review[J]. Neuropsychiatric Disease and Treatment, 2021, 17:3359-3377.
- [7] 张博寒,任志方,王艳玲,等.机器人辅助神经系统疾病病人康复训练的研究进展[J].护理研究,2022,36(7):1203-1209.
- [8] MORONE G, PAOLUCCI S, CHERUBINI A, *et al.* Robot-assisted gait training for stroke patients: current state of the art and perspectives of robotics[J]. Neuropsychiatric Disease and Treatment, 2017, 13:1303-1311.
- [9] TATER P, PANDEY S. Post-stroke movement disorders: clinical spectrum, pathogenesis, and management[J]. Neurology India, 2021, 69(2):272-283.
- [10] SURI R, RODRIGUEZ-PORCEL F, DONOHUE K, *et al.* Post-stroke movement disorders: the clinical, neuroanatomic, and demographic portrait of 284 published cases[J]. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases, 2018, 27(9):2388-2397.
- [11] XIONG F, LIAO X, XIAO J, *et al.* Emerging limb rehabilitation therapy after post-stroke motor recovery[J]. Frontiers in Aging Neuroscience, 2022, 14:863379.
- [12] HUO C C, ZHENG Y, LU W W, *et al.* Prospects for intelligent rehabilitation techniques to treat motor dysfunction[J]. Neural Regeneration Research, 2021, 16(2):264-269.
- [13] DONNELLAN-FERNANDEZ K, IOAKIM A, HORDACRE B. Revisiting dose and intensity of training: opportunities to enhance recovery following stroke[J]. Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases, 2022, 31(11):106789.
- [14] RODGERS H, BOSOMWORTH H, KREBS H I, *et al.* Robot assisted training for the upper limb after stroke(RATULS): a multicentre randomised controlled trial[J]. Lancet, 2019, 394(10192):51-62.
- [15] FREIVOGEL S, MEHRHOLZ J, HUSAK-SOTOMAYOR T, *et al.* Gait training with the newly developed 'LokoHelp'-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. A feasibility study[J]. Brain Injury, 2008, 22(7/8): 625-632.
- [16] WARUTKAR V, DADGAL R, MANGULKAR U R. Use of robotics in gait rehabilitation following stroke: a review[J]. Cureus, 2022, 14(11):e31075.
- [17] MACIEJASZ P, ESCHWEILER J, GERLACH-HAHN K, *et al.* A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation[J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2014, 11:3.
- [18] NEVES M V M, FURLAN L, FREGNI F, *et al.* Robotic-assisted gait training(RAGT) in stroke rehabilitation: a pilot study[J]. Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation, 2023, 5(1):100255.
- [19] BAI Y, LIU F, ZHANG H. Artificial intelligence limb rehabilitation system on account of virtual reality technology on long-term health management of stroke patients in the context of the Internet[J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2022, 2022:2688003.
- [20] ZANATTA F, FARHANE-MEDINA N Z, ADORNI R, *et al.* Combining robot-assisted therapy with virtual reality or using it alone? A systematic review on health-related quality of life in neurological patients[J]. Health and Quality of Life Outcomes, 2023, 21(1):18.
- [21] JONNA P, RAO M. Design of a 6-DoF cost-effective differential-drive based robotic system for upper-limb stroke rehabilitation[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2022, 2022:1423-1427.
- [22] 黄靖远,刘宏增,凌迪,等.康复用虚拟现实健身车的技术基础[J].生物医学工程学杂志,1999,16(4):453-457.
- [23] MANE R, WU Z Z, WANG D. Poststroke motor, cognitive and speech rehabilitation with brain-computer interface: a perspective review[J]. Stroke and Vascular Neurology, 2022, 7(6):541-549.

- [24] LOONED R, WEBB J, XIAO Z G, *et al.* Assisting drinking with an affordable BCI-controlled wearable robot and electrical stimulation: a preliminary investigation[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2014, 11:51.
- [25] KWAK N S, MÜLLER K R, LEE S W. A lower limb exoskeleton control system based on steady state visual evoked potentials[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2015, 12(5):056009.
- [26] SERREZUELA R R, QUEZADA M T, ZAYAS M H, *et al.* Robotic therapy for the hemiplegic shoulder pain: a pilot study[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2020, 17(1):54.
- [27] TAKETOMI M, SHIMIZU Y, KADONE H, *et al.* Hybrid assistive limb intervention for hemiplegic shoulder dysfunction due to stroke[J]. *Cureus*, 2021, 13(11):e19827.
- [28] 苏鹏, 李冬静, 程露露, 等. 上肢康复机器人对脑卒中后肩痛患者的疗效观察[J]. *神经损伤与功能重建*, 2023, 18(3):181-183.
- [29] 金媛媛, 颜文娟. 上肢机器人训练对脑卒中患者认知功能及肩关节本体感觉的影响[J]. *山西医药杂志*, 2021, 50(21):3031-3033.
- [30] BALDAN F, TUROLLA A, RIMINI D, *et al.* Robot-assisted rehabilitation of hand function after stroke: development of prediction models for reference to therapy[J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2021, 57:102534.
- [31] 李莹华. 基于力反馈的手部康复机器人结合任务导向性训练对脑卒中偏瘫患者手指粗大抓握功能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [32] TROMPETTO C, CATALANO M G, FARINA A, *et al.* A soft supernumerary hand for rehabilitation in sub-acute stroke: a pilot study[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):21504.
- [33] COSKUNSU D K, AKCAY S, OGUL O E, *et al.* Effects of robotic rehabilitation on recovery of hand functions in acute stroke: a preliminary randomized controlled study[J]. *Acta Neurologica Scandinavica*, 2022, 146(5):499-511.
- [34] GUO N, WANG X J, DUANMU D H, *et al.* SSVEP-based brain computer interface controlled soft robotic glove for post-stroke hand function rehabilitation[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2022, 30:1737-1744.
- [35] SHI X Q, HEUNG H L, TANG Z Q, *et al.* Effects of a soft robotic hand for hand rehabilitation in chronic stroke survivors[J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2021, 30(7):105812.
- [36] RANZANI R, LAMBERCY O, METZGER J C, *et al.* Neurocognitive robot-assisted rehabilitation of hand function: a randomized control trial on motor recovery in subacute stroke[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2020, 17(1):115.
- [37] SCHRÖDER J, TRUIJEN S, VAN CRIEKGINGE T, *et al.* Feasibility and effectiveness of repetitive gait training early after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 2019, 51(2):78-88.
- [38] TOMIDA K, SONODA S, HIRANO S, *et al.* Randomized controlled trial of gait training using gait exercise assist robot (GEAR) in stroke patients with hemiplegia[J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2019, 28(9):2421-2428.
- [39] YEUNG L F, LAU C C Y, LAI C W K, *et al.* Effects of wearable ankle robotics for stair and over-ground training on sub-acute stroke: a randomized controlled trial[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2021, 18(1):19.
- [40] MAYR A, QUIRBACH E, PICELLI A, *et al.* Early robot-assisted gait retraining in non-ambulatory patients with stroke: a single blind randomized controlled trial[J]. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2018, 54(6):819-826.
- [41] ROJEK A, MIKA A, OLEKSY Ł, *et al.* Effects of exoskeleton gait training on balance, load distribution, and functional status in stroke: a randomized controlled trial[J]. *Frontiers in Neurology*, 2020, 10:1344.
- [42] INOUE S, OTAKA Y, KUMAGAI M, *et al.* Effects of balance exercise assist robot training for patients with hemiparetic stroke: a randomized controlled trial[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2022, 19(1):12.
- [43] KOREN Y, FEINGOLD POLAK R, LEVY-TZEDEK S. Extended interviews with stroke patients over a long-term rehabilitation using human-robot or human-computer interactions[J]. *International Journal of Social Robotics*, 2022, 14(8):1893-1911.
- [44] NAM C, ZHANG B B, CHOW T, *et al.* Home-based self-help telerehabilitation of the upper limb assisted by an electromyography-driven wrist/hand exoneuromusculoskeleton after stroke[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2021, 18(1):137.

(收稿日期:2023-06-01;修回日期:2024-03-25)

(本文编辑 苏琳)