

·综述·

下肢康复机器人在脑卒中患者运动功能障碍中的应用进展

郑 彭¹ 黄国志^{1,2}

脑卒中是脑部血管突然破裂或血管阻塞造成血液循环障碍的一组疾病。脑卒中患者由于大脑和神经系统的损伤,导致各种运动功能障碍的出现,以下肢运动功能障碍对患者的影响最大。针对脑卒中偏瘫患者下肢功能训练,传统康复注重提高患者下肢的单项功能,缺乏综合有效的训练模式。临床中,对于病程较长伴步行不能或下肢痉挛程度较高的患者易出现下肢单项运动好、综合步行能力差的冲突,并且治疗效果与治疗师个人经验密切相关。目前研究表明,脑卒中患者更需要带有持续性、高强度的训练方式。下肢康复机器人作为新的运动神经康复技术,通过模拟正常人的步态,协助患者有效的康复训练。本文主要针对下肢康复机器人治疗的特点和它对脑卒中患者运动功能障碍的应用进行综述。

1 下肢康复机器人技术

1.1 下肢康复机器人的定义

下肢康复机器人是一种自动化的康复训练设备^[1],训练过程运用负重、迈步及平衡原则实现下肢功能的训练^[2]。它为患者提供包括站立训练、行走训练和平衡训练等生理训练模式。最早用于临床医学的下肢康复机器人,起步于20世纪90年代^[3]。目前已经有多种类型的下肢康复机器人用于神经康复领域,为包括脑卒中在内的神经损伤患者提供更为科学有效的训练方式。

1.2 下肢康复机器人治疗的特点

由于传统物理治疗侧重于下肢功能的康复,治疗师逐级对患者髋、膝、踝关节进行训练,这种训练缺乏整体性,不能直接改善患者的步态功能。另一方面,治疗师在训练下肢的过程中未能保证患者躯干的稳定,并且分节式训练一定程度上限制了骨盆和躯干的生理运动。下肢康复机器人模拟正常运动轨迹辅助患者步态训练,利用各种优势加速患者运动再学习的过程。

1.2.1 主动性及抗阻性:下肢康复机器人通过外骨骼系统带动患者下肢各关节主动运动,在关节活动度范围内充分地进行屈伸训练。有研究表明,主动训练可提高早期脑卒中患者的治疗效果。瑞士HOCOMA公司出产的Lokomat步态康复

训练机器人,能在训练中通过外骨骼驱动结构,引导患者双下肢主动进行髋关节的牵拉、膝关节的伸展、足踝的屈曲运动,提高了肢体的运动感知能力,增强患者的平衡与协调能力,使患者更快建立出新的感觉—运动神经通路。

为了激发患者主动运动,训练中需要加入一定的抗阻干预。阻力是肌肉产生应力的基础,是保证肌肉形态和功能的必要条件。抗阻训练对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能、步行能力及日常生活活动能力均有显著的改善作用,该疗法弥补了传统康复缺乏抗阻训练的不足^[4]。国内李年贵等^[5]研究表明,抗阻训练能使患者关节控制能力、肢体负重能力及下肢稳定性进一步提高。李丹阳等^[6]认为抗阻训练本质目的是提高训练效果的转化率,提升整体均衡性。因此,抗阻训练有助于提高患者的体力与运动耐力,对于发病初期肌力较低的脑卒中患者具有促进性的作用。

1.2.2 重复性:现代运动学研究认为重复性训练有助于提高机体运动功能,扩大受训部位在大脑皮质的支配区域,提高神经回路的传递效率^[7]。对于脑卒中患者,需要多次反复进行相同的动作训练,使患者充分体验正常运动感觉和所需力度,较快地提高运动控制能力。French等^[8]对重复性训练改善脑卒中患者肢体运动障碍进行了META分析,指出重复训练可以有效地提高脑卒中患者的下肢运动能力及日常生活能力。下肢康复机器人的训练模式如同正常人的步行,将合理的动作重复千万次,强化肢体感觉的输入,逐渐营造出正确的运动模式。同时密集重复的步行训练能改善下肢肌肉力量,提升患者步行能力。

1.2.3 减重支持性:下肢康复机器人减重系统由支架、减重机构、支撑平衡机构和控制系统组成^[9]。患者通过减重装置减除身体的部分负重,防止步行训练中下肢关节的过度屈曲,并且能够减轻下肢肌群的负荷,增加关节活动范围,缓解肌肉痉挛,对下肢伸肌痉挛的改善有着重要的意义。Bolliger M等^[10]在其研究中指出,减重系统可以维持患者膝关节伸肌的力量,这有助于提高患者膝关节的稳定性,以实现站立的目的。Mayr等^[11]临床实验也发现,对改善患者下肢步行能力,拥有减重治疗系统的机器人组要优于无减重组,通

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2017.06.024

1 南方医科大学附属珠江医院康复医学科,广州,510282; 2 通讯作者
作者简介:郑彭,男,硕士研究生; 收稿日期:2015-11-22

过减重患者在训练中可处于站立位,这促使患者在发病早期就可得到步行训练,避免患者长期卧床而导致各种并发症。

1.2.4 训练的对称性:脑卒中患者长期依赖健侧下肢负重,易形成不对称步态,严重影响患者步行的稳定。下肢康复机器人的训练通过外骨骼或训练踏板等实现双下肢对称性的训练。研究证实对称性的步行训练与患者步行的稳定性呈正相关,为维持稳定,双侧肢体的运动必须协同匹配^[12]。这种匹配加速肢体前后摆动的频率,提高步行速度,促使患侧肢体模仿健侧肢体运动,减少仅单侧训练而出现错误的运动模式。

1.2.5 环境的虚拟性:虚拟现实技术为我们提供了一个全新的应用领域,国内外众多研究机构已经将虚拟现实技术应用到下肢康复机器人的治疗中,增加了训练的趣味性和参与的主动性。Edmans等^[13]研究提示,机器人训练系统应该配合应用虚拟现实技术,在训练中引发“真实的”操作环境,刺激患者视听等感觉系统,直接或间接地调节患者运动控制。患者在训练过程中,沉浸于“真实的”环境不容易被周围环境所干扰。

1.2.6 训练方案的个性化和信息的反馈性:下肢康复机器人与患者之间存在一定的耦合交互作用,通过调控训练模式、训练时间、关节活动度、步行时间—空间等训练参数,专项控制训练的强度和进程,对于不同患者以及同一患者恢复的不同阶段,制定独立的治疗方案。独立个性的训练方案有助于充分发挥患者的主动性和积极性,使患者更容易融入自我的训练环境中。

康复机器人能提供实时的动态检测与分析反馈,包括本体感觉和视觉反馈^[14]。反馈不仅保证训练过程的一致性,而且在训练中能及时发现患者错误的运动信息,将信息记忆保存,加深患者对错误运动模式的认识,强化训练效果。因此,在治疗前后予以完善的参数评估极为关键。Chen G等^[15]研究的下肢外骨骼辅助机器人,通过包裹在小腿的压力感受器感受压力的变化,调控引导力的使用程度,加大对整个训练过程的管控能力。部分下肢康复机器人提供的多功能脚踏板含可刺激足部的本体感受器,这种刺激不仅促进了本体感觉的恢复,同时可以更快的建立出新的信息反馈通路,激活受损大脑的运动区或感觉区^[16]。

2 下肢康复机器人对脑卒中患者下肢运动功能障碍的应用

针对脑卒中患者的康复治疗,神经可塑性原理一直备受研究者们的关注,认为神经系统会随着环境的改变而发生适应性变化^[17]。脑卒中后运动功能的恢复与皮质脊髓束和运动皮质的可塑性有关。皮质脊髓束可塑性修复是指皮质—基底核—中脑—小脑运动通路的活性增加。研究证实^[18],大脑的重塑主要集中于额叶及顶叶的运动皮质之间。Enzinger

等^[19]通过观察脑卒中患者在fMRI下皮质活跃度与步行训练的关系,认为在患侧或健侧下肢的主动运动下,双侧大脑感觉运动皮质的信号活跃度都有增加,范围涉及双侧扣带皮质、尾状核、丘脑半球运动区等,而在被动运动下皮质的信号变化不明显。

有研究指出,强制性诱导运动疗法(constraint-induced movement therapy, CIMT)能够促进受损大脑皮质重塑^[20]。康复机器人通过强化肢体重复性训练,刺激神经肌肉系统,提高空闲神经回路的开放,建立新的神经通路,最大限度地动员受损皮质周围区域的代偿。患者在脑组织受到损伤后,依靠感官系统将外界的信息输入,不断地体验模仿进而重塑,有证据表明,脑卒中后重塑能力高的神经系统可以有效地改善肢体的运动功能。Nudo等^[21]的动物实验证实了这点,分析发现毗邻受损皮质且没有受到损害的区域,能通过刺激修改区域的功能,将接收的信息从原受损的皮质通路直接传入到未受损的皮质上。并且,这种补偿性神经修复机制也可以激活潜伏的神经通路,当主导通路受损后,平时并不常用的旁路可维持一定的代偿功能。

有证据表明脑卒中患者下肢肌力的降低多由于神经损伤引起,患者肌力不足直接影响肢体功能的恢复^[22],导致负重能力下降,由于健侧肢体的代偿,而呈现出划圈、拖拽等异常步态。治疗师把肌力作为临床评估指标引导患者治疗具有重要的意义。传统物理治疗属于单肌群、单关节的训练方式,这难以协调主动肌与拮抗肌运动的统一性。下肢康复机器人通过整合步态训练中的各个因素,协调下肢各肌群进行有序的收缩舒张。这有助于提高下肢力量的整体均衡性。和正常人相比,脑卒中患者下肢肌肉收缩时电活动的峰值明显降低,Li L等^[23]对可穿戴步态训练机器人进行研究,在治疗前后利用肌电图测量患者股直肌、胫骨前肌、股二头肌、腓肠肌内侧头的肌电信号变化。结果显示,患者在屈髋、伸膝及跖屈运动时,被测量的肌肉兴奋程度较治疗前明显增加,步行时的推动力增大,步速得到提高,分析原因可能是训练在提高肌力的同时不加重痉挛,并且下肢康复机器人的训练属于功能相关性肌群训练,将单纯的肌力训练融入到其他功能训练中,例如将康复站立床与步行训练,虚拟与运动训练有效结合,这种综合的训练方式对患者更有意义。虽然增强下肢肌力的重要性已经得到了认可,但是脑卒中患者下肢肌力改善与步行能力提高之间的关联性仍然缺乏足够的证据支持^[24],需要后续更多的临床研究。

目前大多数研究中,康复机器人训练脑卒中患者缺乏神经影像学检查,难以在治疗前后实现脑功能的可视化。Jaeger L等^[25]对磁共振兼容步行机器人(MARCOS)训练装置进行研究,在主动或被动训练刺激下,用fMRI检测患者大脑皮质与皮质下感觉运动区域的血供变化。结果显示,患者主动

步行训练后,大脑皮质信号的活跃程度明显增加。这证实fMRI检查可协助治疗师客观分析大脑可塑性的变化,对康复机器人的训练方案提供有力证据。

目前约有85%脑卒中患者首要的康复目标是恢复步行能力^[26]。从生理角度观察,正常的步行主要依靠髋、膝、踝关节的屈伸运动及重心的转移和骨盆的调整。患者可通过下肢康复机器人模拟正常步态的生理周期,体会如何正确的运动,逐步建立正确的步态模式^[27]。Mayr等^[11]将16例发病在3个月内的脑卒中患者随机分为两组,接受9周的康复治疗。第一组予以3周的下肢康复机器人治疗+3周的传统康复治疗+3周的下肢康复机器人治疗;第二组予以3周的传统康复治疗+3周的下肢康复机器人治疗+3周的传统康复治疗。实验结果证实第一组患者下肢运动能力、步行能力的改善情况较第二组更显著。说明运用下肢康复机器人治疗能更有效地改善偏瘫患者的步行障碍。然而Krishnan^[28]的个案研究提出了相反的观点,认为对于能够步行的患者使用下肢康复机器人治疗,效果并不优于传统康复,原因可能是下肢康复机器人的治疗会让患者产生很强的依赖性,这种依赖性降低了患者的主动参与性。但由于研究属于个案报道,缺乏足够的说服力。Hornby等^[29]也指出,对下肢运动功能的改善治疗师协助康复训练要优于下肢康复机器人,认为脑卒中后步行功能尚未丧失的患者应将治疗师协助治疗作为首选,原因是患者的皮质及运动通路在受损的早期阶段会有一些的自行修复功能,包括临近皮质的重组和健侧同区域的代偿。一方面,下肢康复机器人减重训练模式为患者提供更接近生理的训练模式,这有助于患者早期体会并学习正确的步行模式;另一方面,早期重复性训练能更大程度强化患者肢体感觉与运动的反馈通路。因此,脑卒中患者早期使用下肢康复机器人要优于传统下肢康复训练。

痉挛会严重阻碍脑卒中患者肢体功能的恢复,甚至导致已改善的功能再次丧失,目前痉挛的治疗也是康复领域中的一大难点。随着下肢康复机器人在临床中的应用,有效地减轻了肢体痉挛的程度。国内相关研究^[30],将34例脑卒中下肢痉挛的患者随机分为实验组和观察组,实验组予以下肢康复机器人配合传统运动疗法,观察组仅予以传统运动疗法。经过4周的训练,以Ashworth下肢肌张力评估两组,证实下肢康复机器人配合传统运动疗法对脑卒中患者下肢痉挛的改善效果更明显。而对于远期疗效,目前临床上尚无类似结论,需要更多的随访研究,究其痉挛程度的改善是阶段性的还是长远性的需要进一步证实。

脑卒中患者对平衡功能的训练需要协调诸多因素。部分患者在康复训练后,下肢的肌力得到了提升,但仍存在步行失稳。原因可能是患者的平衡协调能力欠佳。对此,Swinnen E^[31]的研究认为,下肢康复机器人在一定程度上可

改善患者运动时的平衡能力,不论脑卒中患者处于发病早期、恢复期及后遗症期,治疗效果都有一定的改善。Westlake等^[32]经Lokomat下肢康复机器人对患者恢复情况作BBS平衡量表评估,发现下肢康复机器人对患者平衡能力的改善有一定的作用。踝关节是人体稳定性的调节枢纽,承载着身体全部的重量,脑卒中患者训练中踝关节能出现主动的背屈对步行的恢复意义重大^[33]。下肢康复机器人利用足部踏板的上下摆动为患者提供跖屈、背伸的运动模式,结合患者的步行周期,有效地训练了踝关节的关节活动度及站立的稳定性。

3 下肢康复机器人的不足

尽管我们的训练目标是让患者肢体得到充分训练但不达到肌肉的过度疲劳。但是当前下肢康复机器人训练的理想时间和治疗强度尚无统一的定论,在软瘫期和痉挛期抗阻标准也没有严格的区分。如何根据患者的运动参数制定训练标准仍缺乏客观指导。减重模式也存在一定的局限性,患者固定于悬吊装置,肢体活动范围并不完全充分,影响了患者的平衡^[34]以及限制了骨盆的旋转程度。有研究认为,下肢康复机器人训练会降低患者下肢活动的自由度^[35]。下肢康复机器人改善早期脑卒中患者下肢运动功能要优于后遗症期^[36],但对于后遗症期的患者,治疗结论并不一致。临床研究纳入治疗的人群集中于脑卒中发病后3个月内,部分认为小于6个月也可作为纳入标准^[37],但发病超过6个月的训练效果并没有明确的结论。

4 展望

下肢康复机器人的训练能促进正常运动模式的出现,抑制病理反射及异常姿势反射。下肢康复机器人具有较传统康复明显的优势,如长时间、高强度、重复性的训练,在治疗前后提供客观的运动参数。研究发现,运用康复机器人专项训练比泛化功能性的训练更为有效,患者的康复过程需要具有强化作用的靶向性运动训练^[38]。目前康复机器人存在很大的发展空间,将更智能化、人性化、交互性的康复机器人运用到临床康复中是研究人员未来的研究方向,这将有效地解决目前传统康复治疗的局限性。随着康复医学的发展,机器人技术将深入到康复医学更多的领域,对脑卒中后神经系统损伤患者的恢复具有深远的意义。

参考文献

- [1] 倪俊瑜. 下肢康复训练机器人[J]. 中国伤残医学,2011,19(1): 127—128.
- [2] Hesse S, Konrad M, Uhlenbrock D. Treadmill walking with partial body weight support versus floor walking in hemiparetic subjects[J]. Arch Phys Med Rehabil,1999,80(4):421—427.

- [3] Masiero S, Poli P, Rosati G, et al. The value of robotic systems in stroke rehabilitation[J]. *Expert Review of Medical Devices*,2014,11(2):187—198.
- [4] 黄臻,闵瑜,陈佩顺,等. 渐进式抗阻训练对脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*,2009,31(11):760—762.
- [5] 李年贵,孙蕾. 抗阻训练对脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. *中国康复*,2005,20(1):54.
- [6] 李丹阳,崔德刚,汪俊伟. 抗阻训练运动模式研究[J]. *河北体育学院学报*,2012,26(1):52—56.
- [7] 王俊,杨振辉,刘海兵,等. 下肢康复机器人在脑卒中患者步行障碍中的应用和研究进展[J]. *中国康复医学杂志*,2014,29(8):784—788.
- [8] French B, Thomas L, Leathley M, et al. Does repetitive task training improve functional activity after stroke? A Cochrane systematic review and meta-analysis[J]. *J Rehabil Med*,2010,42(1):9—14.
- [9] 锁冬梅,范金涛,傅帆,等. 机器人辅助步行训练在康复领域中的研究进展[J]. *中华物理医学与康复杂志*,2013,35(4):330—332.
- [10] Bolliger M, Banz R, Dietz V, et al. Standardized voluntary force measurement in a lower extremity rehabilitation robot[J]. *J Neuroeng Rehabil*,2008,5:23.
- [11] Mayr A, Kofler M, Quirbach E, et al. Prospective, blinded, randomized crossover study of gait rehabilitation in stroke patients using the Lokomat gait orthosis[J]. *Neurorehabil Neural Repair*,2007,21(4):307—314.
- [12] Coenen P, Werven G, Nunen M, et al. Robot-assisted walking vs overground walking in stroke patients: An evaluation of muscle activity[J]. *Journal of Rehabilitation Medicine*,2012,44(4):331—337.
- [13] Edmans JA, Gladman JRF, Cobb S, et al. Validity of a Virtual Environment for Stroke Rehabilitation[J]. *Stroke*,2006,37(11):2770—2775.
- [14] Kim SH, Banala SK, Brackbill EA, et al. Robot-assisted modifications of gait in healthy individuals[J]. *Exp Brain Res*,2010,202(4):809—824.
- [15] Chen G, Chan CK, Guo Z, et al. A review of lower extremity assistive robotic exoskeletons in rehabilitation therapy[J]. *Crit Rev Biomed Eng*,2013,41(4—5):343—363.
- [16] Werner C, Von Frankenberg S, Treig T, et al. Treadmill training with partial body weight support and an electromechanical gait trainer for restoration of gait in subacute stroke patients: a randomized crossover study[J]. *Stroke*,2002,33(12):2895—2901.
- [17] Rossini PM, Calautti C, Pauri F, et al. Post-stroke plastic reorganisation in the adult brain[J]. *Lancet Neurol*,2003,2(8):493—502.
- [18] Rehme AK, Grefkes C. Cerebral network disorders after stroke: evidence from imaging-based connectivity analyses of active and resting brain states in humans[J]. *J Physiol*,2013,591(Pt 1):17—31.
- [19] Enzinger C, Dawes H, Johansen-Berg H, et al. Brain activity changes associated with treadmill training after stroke[J]. *Stroke*,2009,40(7):2460—2467.
- [20] Caleo M. Rehabilitation and plasticity following stroke: Insights from rodent models[J]. *Neuroscience*,2015,311:180—194.
- [21] Nudo RJ. Postinfarct Cortical Plasticity and Behavioral Recovery[J]. *Stroke*,2007,38(2):840—845.
- [22] Kim CM, Eng JJ. The relationship of lower-extremity muscle torque to locomotor performance in people with stroke[J]. *Phys Ther*,2003,83(1):49—57.
- [23] Li L, Ding L, Chen N, et al. Improved walking ability with wearable robot-assisted training in patients suffering chronic stroke[J]. *Biomed Mater Eng*,2015,26 (Suppl 1):S329—S340.
- [24] Krutulyte G, Kimtys A, Krisciunas A. The effectiveness of physical therapy methods (Bobath and motor relearning program) in rehabilitation of stroke patients[J]. *Medicina (Kaunas)*,2003,39(9):889—895.
- [25] Jaeger L, Marchal-Crespo L, Wolf P, et al. Brain activation associated with active and passive lower limb stepping[J]. *Front Hum Neurosci*,2014,8:828.
- [26] 徐光青,兰月,黄东锋,等. 运动想象对脑卒中患者偏瘫步态和步行能力的影响[J]. *中国康复医学杂志*,2010,25(10):942—946, 952.
- [27] 励建安. 中国康复医学发展的机遇与挑战[J]. *实用医院临床杂志*,2010,7(1):1—3.
- [28] Krishnan C, Kotsapouikis D, Dhafer YY, et al. Reducing Robotic Guidance During Robot-Assisted Gait Training Improves Gait Function: A Case Report on a Stroke Survivor[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*,2013,94(6):1202—1206.
- [29] Hornby T G, Campbell D D, Kahn J H, et al. Enhanced gait-related improvements after therapist- versus robotic-assisted locomotor training in subjects with chronic stroke: a randomized controlled study[J]. *Stroke*,2008,39(6):1786—1792.
- [30] 张红斌,孟兆祥,马灿灿,等. 下肢康复机器人结合运动疗法用于脑卒中患者下肢肌痉挛的近期疗效观察[J]. *中国康复医学杂志*,2013,28(5):449—451.
- [31] Swinnen E, Beckwee D, Meeusen R, et al. Does robot-assisted gait rehabilitation improve balance in stroke patients? A systematic review[J]. *Top Stroke Rehabil*,2014,21(2):87—100.
- [32] Westlake KP, Patten C. Pilot study of Lokomat versus manual-assisted treadmill training for locomotor recovery post-stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*,2009,6:18.
- [33] 罗红梅,孙立波. 脑卒中患者踝背屈手法康复训练加低频电刺激疗法的临床观察[J]. *中国老年学杂志*,2009,29(18):2390—2391.
- [34] Schuck A, Labruyere R, Vallery H, et al. Feasibility and effects of patient-cooperative robot-aided gait training applied in a 4-week pilot trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*,2012,9:31.
- [35] Reinkensmeyer D J, Aoyagi D, Emken J L, et al. Tools for understanding and optimizing robotic gait training[J]. *J Rehabil Res Dev*,2006,43(5):657—670.
- [36] 高春华,黄晓琳,黄杰,等. 下肢康复机器人训练对早期脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*,2014,29(4):351—353.
- [37] Hsieh Y, Lin K, Wu C, et al. Predicting Clinically Significant Changes in Motor and Functional Outcomes After Robot-Assisted Stroke Rehabilitation[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*,2014,95(2):316—321.
- [38] Steultjens E M, Dekker J, Bouter L M, et al. Occupational therapy for stroke patients: a systematic review[J]. *Stroke*,2003,34(3):676—687.