

下肢康复机器人在脊髓损伤康复中的应用

石芝喜¹ 刘四文¹ 杨振辉¹

脊髓损伤后对患者日常生活最大的影响是运动和排尿功能。下肢的运动功能直接影响患者的站立、步行、回归家庭和社会的广度与深度,同时,还对生活的信心和生存质量(quality of life, QOL)造成一定的影响^[1]。因此,脊髓损伤后下肢功能重建对患者日后的生活具有重大的意义。随着现代电子科技的蓬勃发展,智能化康复手段逐渐成为康复设备发展的主流,下肢康复机器人的发展,为脊髓损伤后的下肢功能重建提供了全新的平台,具有广阔的临床应用前景。特别是下肢康复机器人在不完全性脊髓损伤患者步行功能训练中的应用越来越广泛^[2],因为它可为下肢提供重复的助力或抗阻的步行训练^[3]。现代的运动学研究发现^[4],不断地重复训练,有助于肢体运动功能的恢复。而下肢康复机器人是以一种高度重复精确的生理步态模式对下肢提供连续的步行、步态训练,具有高强度性及重复性。近10年来,下肢康复机器人在不完全性脊髓损伤患者步行功能训练中的应用越来越广泛^[5],本文主要针对下肢康复机器人在国内外对脊髓损伤康复中的应用进行综述。

1 康复机器人的发展

康复机器人研究的起步阶段要追溯到20世纪的80年代。在美国,由麻省理工学院Manous技术部门于1989年开始着手开发用于神经康复的机器人,并于1994年由Berke康复医院的前任行政总裁Fletcher McDowell, MD开始将机器人运用于临床^[6]。而在英国,Handy是第一台在商业上获得巨大成功的机器人^[7],由Mike Topping公司于1987年研制,属于辅助型康复机器人。与此同时,许多国家也开始进行康复机器人的研究,并利用机器人的康复技术进行康复训练及减重步行辅助训练^[8]。德国自由大学研制名为MGT型康复机器人^[9],虽然结构设计十分简单,但它让瘫痪患者的站立及步行成为了可能。韩国国立庆尚大学也研制了一种康复机器人^[10],但其主要用于研究人体上肢摆动频率和下肢运动的关系。90年代后,康复机器人得到更进一步的发展,美国先后研制了名为Litegait^[11]和Robomedica^[12]的下肢康复机器人。这两款康复训练机器人的特点是利用相关支撑体支撑

患者身体,使患者下肢不用支撑或部分支撑身体重量,并在这种条件下借助外界(人力或机械力)进行康复行走训练,训练效果较好。由瑞士研制的康复机器人Lokomat^[13]则在减重跑台的基础上,在左右两侧各拥有一个下肢康复机械臂,患者悬吊在跑台上之后,可由机械臂带动进行正确的步态行走,使步行机器人有了更大的进展。Tokyo Denki University大学研制的针对截瘫、偏瘫的外部驱动式矫形器^[14],这种矫形器解决了该类型机器人由于速度、噪音、重量等因素而导致的康复训练效率低下的问题。英国研究者Hunt所在研究小组研制了一种斜躺式三轮康复训练踏车系统^[15],该三轮踏车上安装有编码器和转矩传感器,分别用于测量踏板转动角度、角速度以及使用者的腿部力量。

在国内,机器人的研究工作起步比较晚,目前正处在初步发展阶段。国内多家大学和科研院所都开展了康复机器人相关研究工作。如清华大学、上海交通大学、复旦大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、东南大学、燕山大学等等。清华大学研制的一种新型辅助上肢运动康复机器人^[16],该机器人采用二连杆机构模拟人体上肢,其中机器人上臂、前臂分别由两台伺服电机驱动,可以实现平面内的复合运动。哈尔滨工程大学开发的卧式下肢康复机器人^[17],它由两个相同三自由度机构来给予人体下肢以支撑,能模拟人体下肢运动规律,通过计算机控制下肢关节的运动轨迹,由康复机器人带动人体下肢做各种康复训练,达到锻炼人体下肢的目的。

2 康复机器人分类

康复机器人是帮助残疾人解决生活中活动困难的一种工具,使残疾人获得更强的独立生活能力,提高他们的生存质量。可分为康复训练型机器人及辅助型康复机器人。

康复训练型机器人主要是帮助患者完成各种主、被动康复训练,减轻康复治疗师的劳动强度,解决人工帮助训练达不到全身所有肌肉和关节长时间活动的问题,如行走训练、手及上肢运动训练、脊椎运动训练、颈部运动训练等。

辅助型康复机器人帮助肢体运动有障碍的患者完成各种动作,如智能假肢、智能轮椅、导盲机器人、服务机器人等。

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.01.017

1 广东省工伤康复医院,广州,510440

作者简介:石芝喜,男,治疗师;收稿日期:2013-12-19

3 下肢康复机器人应用于脊髓损伤的研究现状

Wirz M等^[18]在美国芝加哥、德国海德堡、瑞士巴塞尔康复医院的科研组多中心的对慢性不完全性脊髓损伤患者进行康复机器人训练的有效性研究,结果显示20例不完全性脊髓损伤患者在通过康复机器人的训练后,患者的步行能力明显提高而且损伤程度重的患者恢复更显著。同时康复机器人的使用可以减少人力资源,缓解治疗师的压力。Mirbagheri等^[19]在美国芝加哥西北大学医学院物理治疗科选择5例均观察到不同等级的强直痉挛的不完全脊髓损伤的患者,来研究康复机器人训练对不完全性脊髓损伤患者痉挛踝部神经肌肉特性和随意运动的治疗效果。结果显示,康复机器人训练系统具有修正异常功能反射的潜在功能,同时康复机器人训练还可以改善患肢的自主运动能力。Winchester P等^[20]选择在美国德克萨斯、达拉斯物理治疗科训练的且损伤后14周到48个月的4例不完全脊髓损伤患者,研究康复机器人训练是否可以提高不完全性脊髓损伤患者脊髓上中枢神经的可塑性。结果显示1例C5不完全脊髓损伤患者通过康复机器人训练后可提高至单拐支持下独立步行。通过功能性磁共振扫描可发现支配踝足部区域的感觉运动神经皮质出现激活现象。1例C6不完全脊髓损伤患者通过康复机器人训练后可提高至单拐支持下独立步行(左下肢佩戴踝足矫形器),通过功能性磁共振扫描可发现支配踝足部区域的感觉运动神经皮质出现激活现象。1例C5不完全脊髓损伤患者通过康复机器人训练后可提高至前臂拐支持下地面步行(右下肢佩戴踝足矫形器)。通过功能性磁共振扫描可发现支配踝足部区域的感觉运动神经皮质出现激活现象。1例C6不完全脊髓损伤患者通过康复机器人训练后仍不能步行,但通过功能性磁共振扫描可发现支配踝足部区域的感觉运动神经皮质出现激活现象。所以,笔者认为明确任务的康复机器人训练可以提高脊髓损伤患者脊髓上中枢神经的可塑性,并且伴随有功能性的改变。Sherman MF等^[21]选择一例在加拿大温哥华,不列颠哥伦比亚大学人体运动学院训练的第1到第2颈椎间的不完全脊髓损伤患者,研究其使用康复机器人训练后运动-呼吸的配合情况。结果显示患者的每分通气量降低,训练完成后观察到患者的运动-呼吸间的配合,这种配合关系在进行康复机器人训练前是没有的。在该研究中笔者认为不完全性四肢瘫痪的个案病例中,康复机器人训练系统在患者进行运动训练过程中可以减少其对通气的需求量、促进运动-呼吸的相互配合。Colombo G等^[22]比较徒手辅助步行与自动机器人辅助步行训练对截瘫患者的影响,而得出的结果显示说明自动机器人辅助步行训练能减轻治疗师负担,可代替传统治疗。Field-Fote EC等^[23]研究脊髓损伤患者通过跑台上徒手帮助步行、跑台上电刺激帮助步行、地面电刺激帮助步行及Lokomat辅助步行观察步行过程

中减重的变化及步行速度的变换。结果显示跑台上电刺激步行效果最佳,跑台徒手帮助次之,Lokomat无明显效果。其他主要是机器人结合虚拟环境、生物反馈的研究^[24-25],另有研究则侧重于对摄氧量、心率、卡路里等方面^[26]。而在国内,郭素梅等^[27]进行了Lokomat全自动机器人步态训练对不完全性脊髓损伤患者步行功能的影响的相关研究,得出的结论表明机器人自动步态训练能够有助于改善不完全性脊髓损伤患者的步行能力。

4 下肢康复机器人应用于不完全性脊髓损伤的训练

下肢康复机器人应用于不完全性脊髓损伤的训练可分为两类:一类是基础训练,主要是用于提高下肢肌力和关节活动度等;另一类是步行功能整体训练,主要用于患者进行步行及步态训练,以提高步行时身体的稳定性和协调性。

基础训练:应用于下肢基础训练的机器人种类较多,虽然大多数机器人可进行下肢肌力的辅助、被动、抗阻训练,但其缺点是很难复制物理治疗师的手法训练,为患者提供更人性化的指导。目前,NeXOS和Multi-Iso是最接近物理治疗师手法训练的康复机器人^[28]。NeXOS由Bradley设计,主要针对膝、踝关节进行辅助、抗阻、被动3种模式的屈伸训练^[29]。

步行功能整体训练:由于大多数不完全性脊髓损伤患者的下肢功能较差,不能负荷正常的体重,需进行减重,使患者在减轻身体重量的情况下进行符合正常生理的步行训练。可为患者提供持续、规范的步行训练^[30]。在该项训练中,下肢康复机器人的步速与减重装置的减重量是重要调整参数。有研究显示^[31],步行时应将减重量控制在40%以内最为理想,而对步速无严格要求。

应用下肢康复机器人对脊髓损伤患者进行步行训练的最重要目的是让患者以正常的步态进行训练,因此如何规划步态训练就显得尤为重要。由于不完全性脊髓损伤患者下肢功能恢复的特殊性,一般需要两套步态训练方案,即被动步态训练方案和协同控制步态训练方案。对于损伤早期或者功能受损严重的患者,需要进行被动的、预定的轨迹步行,适合采用被动步态训练方法^[32]。随着下肢肌力的恢复,会对以前完全被动的步态产生排斥,甚至导致异常的步行模式,这时就需要协同控制步态训练方案^[33],目的是让患者主动地控制步行,同时机器人又能充分引导完成正确的步行。步行训练中的主动性和互动性对于神经可塑性和运动控制非常重要,固定的被动步行模式不仅会使患者形成依赖,减少肌肉的活动性和新陈代谢,而且会限制下肢运动的多变性。当患者能够更自由地步行时,可在步行中反映出肌肉活性的变化,产生持续传入反馈,重建大脑和脊髓的神经网络,最终对脊髓损伤患者产生非常理想的治疗效果。Wicke等设计的患者协同控制步态训练方案能够让患者自主调节步行时间,

并通过虚拟墙保持在有生理学意义的路径中步行,还可提供视觉训练指导。通过对15例不完全性脊髓损伤患者的研究发现,大部分患者能够主动控制步行时间,进行更加主动的步行^[32]。目前最新的患者协同策略是按需辅助(assist as need, AAN),目的是刺激患者进行最大程度的自主运动,下肢康复机器人仅提供维持生理学步态的最小帮助。但具体实施参数还需进一步研究。

5 下肢康复机器人应用于脊髓损伤可能的恢复理论机制

下肢康复机器人应用于脊髓损伤可能的恢复理论机制主要是基于脊髓步行模式发生器(spinal locomotor pattern generator),脊髓步行模式发生器位于脊髓内,能自动产生稳定振荡,有序激活伸屈肌群进行交替收缩,激发肢体节律运动的(central pattern generators, CPG),具有独立于脊髓上神经中枢和外周感觉输入、自我维持运动神经活动的特性。CPG位于中枢神经系统内,由中间神经元网络构成,是能产生诸如步行、呼吸、咀嚼等自激持续行为的神经元环路,是节律运动的中心控制单元^[34]。

一般认为,哺乳动物(包括人在内)都是通过脊髓步行中枢模式发生器(CPG)控制步行运动,而CPG网络的边界是灵活的,脊髓损伤后脊髓步行CPG可实现网络重组^[35]。研究显示,减重步行平板训练(body weight-supported treadmill training, BWSTT)可使脊髓横断的猫完全恢复后肢步行能力;临床也发现,脊髓损伤患者可通过BWSTT提高步行能力,表明脊髓可能具有运动学习的能力^[36]。

6 下肢康复机器人在脊髓损伤应用中仍存在的问题

下肢康复机器人的发展,推动脊髓损伤运动康复的进步,该项技术在刚起步的今天,有它的优势,同时也存在着一些不可避免的问题。

一种被称为Lokomat的下肢康复机器人能对脊髓损伤患者的踏车训练进行自动控制,最近又增加了视觉、触觉和听觉反馈模式来进行跨越障碍物训练,虽然在对使用该系统的受试者进行问卷调查评分时发现满意度高达80%^[37]。

但也有研究表明,在下肢步行机器人的辅助下,患者行走中骨盆和下肢的活动自由度受到限制,这使得肌肉的运动发动模式与正常人不一样,且缺乏适应外界环境变化的反馈控制策略^[38]。同时,我国哈尔滨工业大学研究的采用AVR单片机的机器人控制系统,成本低,易于产品化。但也存在重力平衡、机器人与患者肢体的干涉等问题^[39]。另外,也有研究表明下肢步行机器人设计也欠完美,如缺乏评估反馈系统、不同类型及时期的患者步行速度、外力减重幅度都是没有统一的规定等^[40-41]。

7 小结

虽然到目前为止还没有证据证明机器人运动训练方法优越于其他方法,但其在脊髓损伤康复领域的应用也值得期待,也是未来的发展方向。从本文的研究来看,下肢康复机器人对脊髓损伤后的步行能力的提高、对异常反射的修正、改善患肢的自主运动功能、脊髓上中枢神经的可塑性及呼吸功能调节均有不同程度的作用,同时也可治疗师减负,实现高强度重复的步行、步态训练的方法。但上述研究的样本量较小,也缺乏空白的对照,可能在未来需进行大样本量的研究,同时增加对脊髓损伤患者在应用下肢康复机器人后的骨密度、泌尿系统、心肺功能、脊髓反射等方面的研究。

值得一提的是,关于下肢康复机器人在脊髓损伤患者步行及步态的研究与脑卒中相比还是明显缺乏,虽然目前下肢步行机器人设备已被多种形式的应用于神经康复领域,但对脊髓损伤步行、步态的研究仅有一些个例的报道,研究的样本也较小。另外,在国外少量的相关研究中虽报道了机器人在脑卒中及脊髓损伤步态康复训练方面的训练效果^[18,42-48],但对于下肢康复机器人对脊髓损伤患者的步行姿势、步行参数、肌痉挛、与步行相关肌肉力量的影响、训练的持续时间,对于不同患者训练参数的设置还没有确定的标准及研究。

最后,对于康复机器人在脊髓损伤的应用中仍存在的一些问题,如患者行走中骨盆和下肢的活动自由度受到限制,缺乏适应外界环境变化的反馈控制策略等,只有等科技的不断进步再加以调整及进步,同时治疗师也要全面的了解机器人设备,只有全面了解机器人设备并根据患者的运动能力不断调整训练参数,以致使患者在精确控制环境下最大限度地发挥自主运动能力,才能获得最佳的运动训练效果。

参考文献

- [1] Behrman AL, Harkema SJ. Physical rehabilitation as an agent for recovery after spinal cord injury[J]. Phys Med Rehabil Clin N Am, 2007, 18(2): 183—202.
- [2] Malcolm P, Segers V, Caekenberghe IV, et al. Experimental study of the influence of the m. tibialis anterior on the walk-to-run transition by means of a powered ankle-foot exoskeleton[J]. Gait Posture, 2009, 29: 6—10.
- [3] Akdogan E, Arif M. The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: Physiotherabot[J]. Mechatronics, 2011, 21:509—522.
- [4] 郝正玮,李建民,赵雅宁,等.下肢康复训练机器人的研究进展[J].中华物理医学与康复杂志. 2012, 11:862—863.
- [5] Malcolm P, Segers V, Caekenberghe IV, et al. Experimental study of the influence of the m. tibialis anterior on the walk-to-run transition by means of a powered ankle-foot exoskeleton[J]. Gait Posture, 2009, 29: 6—10.

- [6] Krebs HI, Hogan N. Robotic therapy: The tipping point[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2012, 91(Suppl):S290—S297.
- [7] Hillman M. Rehabilitation robotics from past to present—a historical perspective[J]. *Proceedings of the ICORR 2003 (The English International Conference on Rehabilitation Robotics)*, 2003, 4:23—25.
- [8] Hesse S, Schmidt H, Werner C, et al. Upper and lower extremity robotic devices for rehabilitation and for studying motor control[J]. *Curr Opin Neurol*, 2003, 16:705—710.
- [9] Colombo G, Joerg M, Schreier R, et al. Treadmill training of paraplegic patients with a robotic orthosis[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2000, 37 (6):693—700.
- [10] B. Novandy, Christiad. and J. W. Yoon. Development of Gait Rehabilitation Robot Driven by Upper Limb Motion [J]. *International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea (South), 2007:2383—2388.
- [11] Krebs HI, Volpe BT, Williams D, et al. Robot-aided neuron rehabilitation: a robot for wrist rehabilitation[J]. *IEEE Transactions. Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007, 15(3):327—335.
- [12] Krebs HI, Volpe BT, Aisen ML, et al. Increasing productivity and quality of care: robot-aided rehabilitation[J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2000, 37(5): 639—652.
- [13] Hidler J, Wisman W, Neckel N. Kinematic trajectories while walking within the Lokomat robotic gait-orthosis [J]. *Clinical Biomechanics*, 2008, 23(10):1251—1259.
- [14] Yukio S, Kazuya K, Hiroshi N, et al. Development of Externally Powered Lower Limb Orthosis with Bilateral-servo Actuator *Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*[J]. Chicago, IL, USA, 2005.394—399 .
- [15] Hunt KJ, Stone B, Negard NO, et al. Control strategies for integration of electric motor assist and functional electrical stimulation in paraplegic cycling: utility for exercise testing and mobile cycling[J]. *IEEE Trans on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2004, 12(1):89—101.
- [16] 张秀峰, 季林红, 王景新. 辅助上肢运动康复机器人技术研究 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(11):1864—1867.
- [17] 钱振美. 卧式下肢康复机器人的研究[D]. 2006:57.
- [18] Wirz M, Zemon DH, Rupp R, et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: a multicenter trial[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86:672—680.
- [19] Mirbagheri MMC, Tsao C, Pelosin, et al. Therapeutic effects of robotic- assisted locomotor training on neuromuscular properties[J]. *Proceedings of the 2005 IEEE, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, June 28- July 1, 2005, Chicago, IL, USA.
- [20] Winchester P, Mccoll R, Querry R, et al. Changes in supraspinal activation patterns following robotic locomotor therapy in motor-incomplete spinal cord injury[J]. *Neurorehabilitation and neural repair*, 2005, 19(4):313—324.
- [21] Sherman MF, Lam T, Sheel AW. Locomotor-respiratory synchronization after body weight supported treadmill training in incomplete tetraplegia: a case report[J]. *Spinal Cord*, 2009, 19:213—215.
- [22] Colombo G, Wirz M, Dietz V. Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegia patients[J]. *Spinal Cord*, 2001, 39:252—255.
- [23] Field-Fote EC, Roach KE. Influence of a locomotor training approach on walking speed and distance in people with chronic spinal cord injury: a randomized clinical trial [J]. *Physical Therapy*, 91(1): 1—13.
- [24] Wellner M, Thüning T, Smajic E, et al. Obstacle crossing in a virtual environment with the rehabilitation gait robot Lokomat[J]. *Stud Health Technol Inform*, 2007, 125:497—499.
- [25] Lünenburger L, Colombo G, Riener R, et al. Biofeedback in gait training with the robotic orthosis Lokomat[J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2004, 7:4888—4891.
- [26] Nash MS, Jacobs PL, Johnson BM, et al. Metabolic and cardiac responses to robotic-assisted locomotion in motor-complete tetraplegia: a case report[J]. *J Spinal Cord Med*, 2004, 27(1):78—82.
- [27] 郭素梅, 李建民, 吴庆文, 等. Lokomat全自动机器人步态训练与评定系统对不完全性脊髓损伤患者步行功能的影响[J]. *中国组织工程研究*, 2012, 16(13):2324—2325.
- [28] Akdogan E, Arif M. The design and control of a therapeutic exercise robot for lower limb rehabilitation: Physiotherabot[J]. *Mechatronics*, 2011, 21:509—522.
- [29] Bradley D, Marquez C, Hawley M, et al. NeXOS - the design, development, and evaluation of a rehabilitation system for the lower limbs[J]. *Mechatronics*, 2009, 19: 247—257.
- [30] Hussain S, Xie SQ, Liu G. Robot assisted treadmill training: Mechanisms and training strategies[J]. *Med Eng Phys*, 2010, 33: 527—533.
- [31] Klarner T, Chan HK, Wakeling JM, et al. Patterns of muscle coordination vary with stride frequency during weight assisted treadmill walking[J]. *Gait Posture*, 2010, 31(3): 360—365.
- [32] Duschau-Wicke A, von Zitzewitz J, Caprez A, et al. Path control: a method for patient-cooperative robot-aided gait re-

- habilitation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2010, 18(1):38—48.
- [33] Vallery H, van Asseldonk EH, Buss M, et al. Reference trajectory generation for rehabilitation robots: Complementary limb motion estimation[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2009, 17(1): 23—30.
- [34] Marder E, Bucher D. Central pattern generators and the control of rhythmic movements[J]. Curr Biol, 2001, 11: R986—996.
- [35] 张纓, 纪树荣. 脊髓步行中枢模式发生器[J]. 中国康复理论与实践, 2006, 12(12): 1017—1019.
- [36] Pearson KG. Could enhanced reflex function contribute to improving locomotion after spinal cord repair[J]. J Physiol, 2001, 533:75—81.
- [37] Wellner M, Thüning T, Smajic E, et al. Obstacle crossing in a virtual environment with the rehabilitation gait robot LOKOMAT[J]. Stud Health Technol Inform, 2007, 125:497—499.
- [38] Reinkensmeyer DJ, Aoyagi D, Emken JL, et al. Tools for understanding and optimizing robotic gait training[J]. J Rehabil Res Dev, 2006, 43(5) : 657—670.
- [39] 张立勋, 颜庆, 杨勇, 等. 下肢康复训练机器人 AVR 单片机控制系统[J]. 机械与电子, 2004, (10) : 52—55.
- [40] Hidler J, Neckel N. Inverse-dynamics based assessment of gait using a robotic orthosis[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2006, 1:185—188.
- [41] 王伟, 李岩, 吴华, 等. 下肢康复机器人训练对急性脑卒中下肢运动功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志[J]. 2013, 6: 464—467.
- [42] Hornby TG, Zemon DH, Campbell D. Robotic-assisted, body-weight-supported treadmill training in individuals following motor incomplete spinal cord injury[J]. Phys Ther, 2005, 85(1):52—66.
- [43] Nooijen CF, Ter Hoeve N, Field-Fote EC. Gait quality is improved by locomotor training in individuals with SCI regardless of training approach[J]. J Neuroeng Rehabil, 2009, 6: 36.
- [44] Field-Fote EC, Lindley SD, Sherman AL. Locomotor training approaches for individuals with spinal cord injury: a preliminary report of walking-related outcomes[J]. J Neurol Phys Ther, 2005, 29(3):127—137.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2009, 23(1):5—13.
- [48] Hornby TG, Campbell DD, Kahn JH, 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.