

·综述·

## 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\*

王 俊<sup>1,2</sup> 杨振辉<sup>1</sup> 刘海兵<sup>1</sup> 遇 光<sup>2</sup> 唐 丹<sup>1</sup>

行走是人类最基本的功能,是保证人类进行正常独立生活的必备条件。据统计,在脑卒中后3个月约有45%幸存的患者不能恢复到独立步行的程度,只能以异常步态行走,打乱了正常的步行规律,使患侧肢体不能真正的负重<sup>[1]</sup>。因此,提高患者步行能力成为脑卒中后康复急需解决的问题之一<sup>[2]</sup>。传统的康复治疗通常包括神经促进技术、平衡训练、步行、强化肌力等方法,大多数脑卒中患者经过早期康复治疗,其平衡和运动功能均能得到一定的改善,但这些传统的康复治疗只是重视下肢功能的康复,训练过程中难以将步行中的负重、迈步、平衡三要素有机结合起来,造成患者异常步态<sup>[3]</sup>,而且传统的康复疗法主要依赖于治疗师的一对一训练,难以实现高强度、有针对性和重复性的训练要求,而且治疗师的劳动强度大,难以保证训练的持续性和稳定性,治疗效果还受到治疗师水平的影响。现代运动学研究表明,不断地重复训练有助于提高机体的运动功能,来达到提高神经功能可塑性的目的。

康复机器人(rehabilitation robots)作为一种新型机器人,它贯穿了康复医学、生物力学、机械学、电子学、材料学、计算机科学及机器人等众多领域,是一种自动化程度很高又有效的康复训练<sup>[4]</sup>。康复机器人分为康复训练机器人和辅助型康复机器人。康复训练机器人的主要功能是帮助患者完成各种运动功能的恢复训练,如行走功能训练、手臂运动训练、脊椎运动训练、颈部运动训练等;辅助型康复机器人主要用来帮助肢体运动有困难的患者完成各种动作,如机器人轮椅、导盲手杖、机器人假肢、机器人护士等。康复治疗的过程中,改善患者的行走能力,提高其生活自理能力,是使其回归社会的重要方面,因此下肢的康复十分重要。下肢康复训练机器人是康复训练机器人中重要的一类,它可以模拟正常人的行走姿势,并且可以承担一部分人体的重量,对下肢有运动障碍的患者进行有效的康复训练<sup>[5]</sup>。通过帮助患者模拟正常人的步行规律,训练下肢肌肉,恢复神经系统对行走功能的控制能力,达到恢复下肢运动功能的目的<sup>[6]</sup>。康复机器人作为一种自动化设备,可以帮助患者进行科学而又有效的康复训练,使患者的运动技能得到更好的恢复。本实验所采用

的机器人是利用上述原理,根据减重步行的原理,可控制患者下肢活动角度、步行速度、踝关节角度<sup>[7]</sup>。

Lokomat(Hocoma, AG, 瑞士)下肢康复机器人训练系统<sup>[8-9]</sup>可提供安全、有效及重复稳定的定量运动输入,不仅可为患者提供早期康复步行训练,有利于大脑神经功能重组,而且可为患者提供多种训练模式和训练场景,满足康复训练的需要。研究表明,定时、定量的康复训练有利于患者中枢神经系统功能重塑,促进其恢复肢体运动功能。基于上述背景,本文就Lokomat下肢康复机器人训练系统在脑卒中患者步行障碍中的应用和研究进展做一综述。

### 1 下肢康复机器人训练系统

Lokomat下肢康复机器人训练系统由瑞士Hocoma医疗器械公司与瑞士苏黎世Balgrist医学院合作推出,这个全自动下肢康复机器人训练系统主要由外骨骼式矫正器、减重支持系统和运动跑台组成。

#### 1.1 外骨骼式矫正器

外骨骼式矫正器被连接到一个弹簧支撑的四边形结构上,是下肢康复机器人训练系统的核心部分。外骨骼式矫正器是双腿对称的助行结构,患者的双下肢由可以调节的固定带固定到矫正器上,足部升降带固定患者的踝关节并使其处于中立位置,当患者在迈步时被动地引起足背屈。当患者有足够的踝足部肌力和控制能力时,可以不佩戴或降低升降带的张力,这样减少了患者的踝足部限制,有利于其发挥自主踝足部肌力。患者的髋关节和膝关节由计算机控制,并配有相应的位置和力量感受器,患者和治疗师可以通过两个计算机屏幕对患者的运动表现实行动态观察和严密检测。

#### 1.2 减重支持系统

减重支持系统主要由固定支架、减重机构和控制系统组成,训练过程中,减重支持系统通过电力驱动,悬吊患者胸部绑带支撑部分体重,身体被悬吊的重量可从升降杆上的显示板上读出,固定支架主要提供支撑和稳定。

#### 1.3 运动跑台

运动跑台是下肢康复机器人训练系统的重要组成部分,

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2014.08.025

\*基金项目:广东省卫生厅资助项目(A2013479)

1 广东省工伤康复中心,广州,510440; 2 苏州瑞盛康复医院

作者简介:王俊,男,副主任医师; 收稿日期:2014-02-20

它的主要作用是和外骨骼式矫正器协调随动,为患者提供正常生理模式的步行步态训练,同时也可为患者提供部分体重支持,治疗师可根据患者的功能情况随时调整运动跑台速度,并可通过计算机屏幕观察患者的运动表现。

## 2 在脑卒中患者步行障碍中的应用

脑卒中是严重威胁人类生命和健康的常见病、多发病,其病死率和致残率均较高,步行功能及日常生活能力受到较大影响。发病后肢体运动功能障碍是最常见的功能障碍,85%脑卒中幸存者的首要康复目标是恢复其步行能力<sup>[2]</sup>,这往往是偏瘫患者最迫切的愿望和需求<sup>[10]</sup>。步行功能的恢复,是提高脑卒中患者日常生活活动能力,改善其生活质量的关键<sup>[11]</sup>。研究表明,脑卒中或脊髓损伤等神经源性损伤造成的下肢瘫痪的患者,通过减重平台或地面步行训练可提高其步行能力<sup>[12-14]</sup>。但是减重平板训练的操作较为复杂,且易造成患者恐惧而加重痉挛影响治疗效果<sup>[15]</sup>,同时对于步行过程中改善运动控制模式效果不佳,尤其是偏瘫侧下肢髋、膝、踝关节的控制能力对减重平板训练的影响较大。脑卒中偏瘫患者偏瘫侧小腿三头肌力量减弱、膝关节失稳、踝关节活动范围差,同时下肢肌肉痉挛、失衡导致患者廓清及推进能力下降,最终造成行走功能异常<sup>[16]</sup>。减重平板训练也有一定的局限性:训练的劳动强度太大,需要3个或3个以上的治疗师协助治疗,训练时间也少于取得最佳治疗效果所需的时间;因为训练过程中治疗师需要采取人体工效学上不合理的姿势,治疗师经常遭受背部疼痛的困扰;传统减重平板训练的步态模式不可重复,没有对患者的直接反馈,训练效果与治疗师经验密切相关<sup>[17]</sup>。Lokomat下肢康复机器人训练系统的优点为安全性好、可重复运动、延长训练时间、减少人力成本、不受发病时间限制、可客观地对康复效果进行观察和评价等。下肢康复机器人辅助康复训练,利用下肢外骨骼式机械腿牵引大腿和小腿协调摆动完成下肢行走训练,对提高脑卒中偏瘫患者运动感觉的输入及神经功能的重塑与运动功能的康复有十分积极的作用。目前有研究证实,脑卒中偏瘫患者在急性期、亚急性期和慢性期均可以接受下肢康复机器人训练,下肢康复机器人治疗能改善脑卒中患者的步行功能。

### 2.1 在偏瘫患者急性和亚急性期的应用

对于急性期脑卒中患者,赵雅宁等<sup>[18]</sup>研究发现,经过10w的训练,机器人治疗组在步长、步频、步速及病灶侧动脉的血流速度方面均有明显的改善,且差异有显著性意义。这说明采用下肢康复机器人进行康复训练,能有效地促进局部吻合支开放的血流速度和数量,加快血液循环,从而提高脑功能的恢复。在另外一项随机对照实验中,赵雅宁等<sup>[19]</sup>纳入发病大约3周的40例脑卒中偏瘫患者,随机分为Lokomat组(20例)和对照组(20例),两组均给予常规肢体功能训练,对

照组采用常规康复治疗,Lokomat组给予下肢康复机器人为主的运动训练,均接受每周3次,每次30min,共10w治疗,结果显示治疗后Lokomat组反映步行功能的步态参数的步速、步长、步宽、步频,以及反映步态指标的前足活动(屈/伸)、后足活动(内翻加外翻)、踝—后足稳定性和足部对线的评分变化明显优于对照组。说明了下肢康复机器人训练对改善偏瘫患者下肢功能有良好的治疗效果。这可能是由于下肢康复机器人训练通过模拟正常的行走周期,提供了重复性的功能运动,而重复性的功能运动可以强化肢体深浅感觉输入刺激,改善神经损伤患者的肌肉力量和运动协调性。因此,通过下肢康复机器人训练有助于提高上运动神经元损伤患者的步行能力<sup>[20]</sup>,从而减少患侧和健侧步幅差、提高步行的速度和步态对称性。郝正玮等<sup>[21]</sup>在一项对40例首次脑卒中后1—3个月患者的研究显示,Lokomat治疗组在提高下肢关节活动度范围和下肢运动功能方面优于传统治疗组。在另一项包括27例亚急性期脑卒中患者的研究证实,机器人辅助步行训练的效果优于治疗师辅助跑台训练<sup>[22]</sup>。这表明,对于急性期或亚急性期的脑卒中偏瘫患者由于身体支持下降,缺乏远端运动肢体控制,需要治疗师大量的帮助,难于进行治疗师辅助跑台训练,而下肢康复机器人具有减重系统、外骨骼式步态矫正器和智能控制系统,可以提供长期重复性定量运动输入,在该系统软件控制下,依据偏瘫患者的实际情况,在早期减重状态下,患者步行时髋关节和膝关节在外骨骼式矫正器的带动下以预设的运动模式进行早期步行训练,因此,下肢康复机器人的应用在偏瘫患者急性和亚急性期可以更有效地帮助患者协调其步态,同时为患者创造一个更加个性化的训练,下肢康复机器人训练能帮助患者稳定躯干和骨盆,通过减重悬吊系统防止患侧膝关节过度屈曲和肢体廓清障碍,促进患者更加接近正常的生理步态模式。

### 2.2 在偏瘫患者慢性期的应用

对于慢性期脑卒中偏瘫患者,下肢康复机器人训练的效果显示出不一致的结局。Westlake等<sup>[23]</sup>将16例脑卒中后轻度偏瘫患者随机分为Lokomat组(8例)和人工减重训练组(8例),两组均按照(0.92±0.15)m/s(快)或(0.58±0.12)(缓慢)的步行速度训练4w,结果显示治疗后,Lokomat组地面步行速度、6min步行距离和患侧步长比例均得到改善,且差异有显著性意义,而人工减重训练组只有平衡能力稍有改善。说明Lokomat下肢康复机器人训练效果优于人工减重训练。在另外两项下肢康复机器人训练慢性期脑卒中偏瘫患者应用的研究显示,经过每周3次,每次30min并持续4w的治疗后,机器人治疗组和传统运动治疗组的步行训练结果没有显著性差异<sup>[24-25]</sup>。对于慢性期的脑卒中患者来说,下肢康复机器人辅助步行训练的效果并不优于传统治疗,这可能是因为在卒中后的慢性期,患者的功能本身处于恢复的平台期,另

外一种解释可能是下肢康复机器人设备容易使患者依靠设备的引导力而趋于被动,从而影响患者自主肌肉收缩力量的发挥,在整个训练过程中,为了安全的需要和减少操作的复杂性,机器人设备对患者的躯干和髋部有一定的限制。减重支持系统通过胸腰部吊带固定患者的躯干,外骨骼式矫正器在两侧及后面固定患者的髋部,使髋部的自由度限制在垂直面,这样不但限制了患者髋部的左右旋转、重心的转移和躯干的运动,而且也减少了患者在步行时为了保持平衡和整个姿势稳定所需要的某些自主肌肉活动。因此,患者在机器人辅助步行与单纯步行和治疗师帮助下的运动平板步行可能有一定的差距,也可能比治疗师辅助下的运动平板步行训练消耗更少的能量,这样减少的有氧刺激程度也可能影响下肢康复机器人步行训练的效果。此外,训练的速度、引导力、下肢各关节角度调节不合适也会影响外骨骼式矫正器与跑台的同步性,也有可能影响训练的效果。因此,治疗师必须要根据每个患者的运动能力采用个性化最佳的参数设置才能取得比较理想的治疗效果。

### 3 下肢康复机器人训练的可能机制

目前脑卒中运动功能康复的机制尚不完全清楚,利用大脑受损后具有重新映射或建立新的神经通路的潜能这一新理念,下肢康复机器人训练提供了重新学习运动技能所需的运动训练,它的可能机制是运动再学习。一项关于脑卒中患者的Meta分析指出,大量重复的运动治疗有利于改善日常生活活动能力,训练时间与步行能力之间呈正相关。人类在熟悉环境下的行走是相对机械化的过程<sup>[26]</sup>,因此不断重复的步态训练是改善步行能力的有效方法之一。早期介入下肢康复机器人训练的目的是促使存在步行障碍的脑卒中偏瘫患者尽早开始进行步行训练,刺激其“中枢模式发生器”(central pattern generator, CPG),当特定感觉传入后,CPG产生步行中屈肌和伸肌交替转换的神经节律冲动,首先屈肌兴奋性冲动通过中间神经元抑制伸肌活动,屈肌兴奋完成后伸肌神经兴奋释放,引起伸肌活动,从而在步行动作启动之后,产生自发性屈肌—伸肌交替兴奋,产生迈步动作。此外,步行训练也可刺激大脑皮质功能,激活受累大脑半球的运动区和感觉区的活动,介入越早,大脑的可塑性越好,运动功能恢复的潜力就越大。

步长是影响偏瘫患者自由或最大步行速度的最重要因素,多位学者的研究表明,步速可视为步行能力的综合指标。其与偏瘫患者平衡功能、活动能力、下肢的运动功能等均呈高度相关。Lokomat下肢康复机器人系统有起到调节平衡杠的作用,在患者上肢功能无明显障碍的情况下,可以调整平衡杠的宽度使其模仿正常人步行的模式并协调摆臂步行,不但可以帮助稳定身体,而且可以减少双足与地面的

扭转运动,因而这在整体上可以起到改善平衡的作用,提高平衡控制。平衡控制是步行的关键因素,当发生运动或者外界干扰时,平衡控制可稳定躯干而做成各种姿态反应调整。Kelly P等<sup>[23]</sup>研究并观察了下肢康复机器人对脑卒中偏瘫患者平衡功能的影响,结果显示,下肢康复机器人训练有助于提高偏瘫患者的平衡功能。赵雅宁等<sup>[19]</sup>研究也证实,下肢康复机器人可以明显提高偏瘫患者的静态和动态平衡,同时可以明显改善患者的踝背屈功能。踝关节是人体稳定性的一个微调枢纽,能否出现背屈对下肢运动功能、平衡和步态有着极其重要的意义<sup>[27]</sup>。一方面可能是由于下肢康复机器人系统配备的足部升降带在摆动期踝关节进行主动背屈的动作,另一方面可以抑制足趾的跖屈破坏下肢伸肌共同运动模式,使足趾伸展,刺激诱发出所需要的踝关节背屈肌肉反应,从而提高踝关节的背屈功能。

脑卒中偏瘫患者步行功能的康复是一连续的过程,应用下肢康复机器人进行步行训练,在早期根据患者具体情况设定合适的减重程度和引导力,随着患者病情的好转,下肢肌力的恢复,逐渐减少减重程度。此过程中,患者真正体会正常的步行运动模式的感觉,避免了传统治疗过程因用力、负重过程中诱发异常运动模式或使痉挛加重,同时防止各种代偿动作出现。此外,训练过程中机器人训练系统能对患者进行视觉反馈,提高患者治疗的积极性,对患者步行功能的恢复有很大帮助。

### 4 现状与展望

近年来减重步行训练(partial body weight support treadmill training, PBWSTT)在临床上的应用越来越广泛。自20世纪90年代初以来,国内外多家研究机构利用机器人技术相继开发了代替治疗师辅助患者的减重步行康复训练设备。利用这种康复训练机器人进行步行康复训练,不仅减轻治疗师的工作强度,而且步行训练参数重复性好,时相指标可以准确设定,能够有效加快康复进程,提高康复疗效<sup>[28]</sup>。康复机器人技术在欧美等国家得到了科研工作者和医疗机构的普遍重视,早在20世纪60年代早期,临床医生就使用连续被动运动机器(continuous passive motion, CPM)辅助外科手术患者的康复。从第一台在商业上获得巨大成功的康复机器人Handy至今,康复机器人获得了巨大的发展。为了更好地促进运动康复和实现运动控制,自动化和机器人辅助的运动康复从上世纪90年代开始出现。下肢康复机器人疗法最初集中在肌肉的运动知觉反馈上,后来扩展到以功能电刺激和虚拟现实为基础的治疗系统。第一台商业化的植入型足下垂刺激器(foot drop stimulator, FDS)由Rancho Los Amigos医疗中心和Medtronic公司共同开发。尽管电极的植入会导致感染等一系列问题,总体来说植入型足下垂刺激

器仍是早期康复机器人一个成功的典范<sup>[29]</sup>。于是国内外的许多机构就开始利用机器人的康复技术进行康复训练以及进行减重步行辅助训练。当机器人训练临床策略应用于神经系统损伤的疾病时,成为众多研究人员和临床医生研究的对象,且发展到了临床的领域<sup>[7]</sup>。目前国内璟和技创机器人训练系统 Flexbot®2013,即多体位智能化下肢康复训练机器人,可以通过模拟正常人行走的运动轨迹来对患者进行训练,它是根据康复医学理论和人机合作机器人原理,在一套由计算机控制的步态模拟控制系统的控制下,帮助患者模拟正常人的步行规律进行康复训练,训练下肢肌肉,恢复神经功能,达到恢复下肢运动功能的目的<sup>[6]</sup>。康复机器人能通过带动肢体进行重复性运动,能够重建运动控制,从而恢复肢体运动功能,是一种新的临床干预手段。医学上通常是通过进行重复的特定任务训练让患者进行足够的重复性活动,不仅可以对患者施加精确的运动干预,也可以记录患者的运动次数<sup>[30]</sup>,基于这种方法的训练已取得良好的临床效果。

然而,下肢康复治疗技术及康复机器人辅助治疗的研究任重而道远。康复训练机器人具备许多人工所无法比拟的优点,例如长期、稳定地重复训练,精确、客观地测定训练与运动参数,提供实时反馈,远程训练等。通过虚拟现实、脑电、肌电技术与机器人技术的集成,为患者提供全方位的治疗,而促进康复机器人进一步的智能化仍是临床康复医学工作者普遍关心的问题,也是康复机器人发展的重要方向<sup>[31]</sup>。正确反复的视觉反馈强化,无论是力量还是对称训练,对大脑皮质都是一种条件性的重复刺激,经长期反复训练能形成相应的条件反射,并在大脑皮质形成兴奋灶,有助于在正确的部位重组或再塑中枢神经功能,建立趋于正常的运动模式。同时,多体位智能化下肢康复机器人可以通过下肢重复性运动,减少患者关节异位性骨化的发生,刺激肢体的位置觉、关节觉,促进肢体运动感觉的恢复,还能增强髌、膝、踝关节的稳定性和协调性,也加强了体力和耐力。其配合常规康复训练能很好地改善患者的下肢运动功能、平衡能力,有助于ADL能力的提高及步态的改善,最大限度地改善患者生存质量<sup>[32]</sup>。

目前神经康复领域已大量采用机器人设备对各种因神经系统受损导致功能障碍的患者进行步行康复训练, Lokomat 下肢康复机器人是目前应用最广泛的一种,其临床应用的目标就是通过调节和控制患者下肢运动,根据运动学习理论使其重新获得生理性步行模式和提高步行能力。虽然机器人在康复领域的应用有其明显的优势,比如下肢康复机器人能够在精确控制的环境下为患者提供高强度、可重复、时间长、安全的治疗,而且只需要一位物理治疗师的参与;另外只要患者的病情稳定,卒中后早期就可以开始训练,这样不仅可以促进患者的早期功能恢复,而且有助于预防其并发

症发生。但是下肢康复机器人训练的理想时间长度和治疗强度尚无定论,不同研究者选取的时间长度和治疗强度也不一样。

基于目前的研究状况,下肢康复机器人的研究仍有很大的发展空间,治疗师只有全面地了解 and 掌握下肢康复机器人,才能使机器人治疗更好地应用于临床;治疗师可以根据患者的运动能力不断地调整治疗参数,在患者主动能力不足时提供更大的辅助治疗,在有能力完成动作时,适当减小辅助,以便充分发挥患者残存的功能,使患者在精确控制的情况下最大限度地发挥自主运动能力,获得最佳的运动训练效果<sup>[33]</sup>。在治疗效果方面,下肢康复机器人训练对脑卒中偏瘫患者后步行能力的提高证据尚不充分,有待进一步研究。机器人辅助步态训练,目的在于帮助患者进行运动再学习和模拟正常的生理步态模式,避免偏瘫步态。下肢康复机器人作为一种高度自动化设备,可以帮助患者进行科学和有效的运动康复训练,使患者的运动功能得到更好的恢复<sup>[7]</sup>。

下肢康复机器人具备许多人工所无法比拟的特点,例如长期、稳定地定量运动输入,提供实时的反馈信息,保证训练过程中的一致性和持续性,实现训练方案及康复评估参数化<sup>[34]</sup>。随着老龄化加剧,脑卒中偏瘫患者不断增多,下肢康复机器人所具有的这些优点具有越来越大的使用价值。但是如何根据一位特定患者的需要来选择治疗参数仍然未知。我们仍然未知什么是合适的治疗剂量,或者在成本效益方面如何用最小的强度来达到最大的效果。过多的治疗是否对患者有不利影响,对于轻度、中度和重度脑卒中的患者应该使用基于损害水平的方法还是基于功能水平的方法。所以这些都需要进行更多更深入的研究。相信下肢康复机器人广阔的市场前景必将推动这一新兴的技术得到更多重视和推广。

## 参考文献

- [1] 喻锦成,符俏.减重步行训练在脑卒中康复中的应用进展[J].海南医学,2010,21(1):26—29.
- [2] Candelise L, Gattinoni M, Bersano A, et al. Stroke-unit care for acute stroke patients: an observational follow-up study[J]. Lancet, 2007, 369(9558):299—305.
- [3] 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.
- [4] 倪俊瑜.下肢康复训练机器人[J].中国伤残医学,2010,19(1):127—128.
- [5] 高峰,杜良杰.脊髓损伤患者的下肢功能重建:智能化康复手段[J].中国康复理论与实践,2008,14(9):845—846.
- [6] 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—54.
- [7] 谢欲晓,白伟,张羽.下肢康复训练机器人的研究现状与趋势[J].中国医疗器械信息,2010,16(2):5—8.

- [8] 杨振辉.下肢康复机器人的应用[J].现代职业安全,2012,135(11):115—117.
- [9] Hidler JM, Wall AE. Alterations in muscle activation patterns during robotic- assisted walking[J]. Clin Biomech, 2005, 20(2):184—193.
- [10] Langhorne P, Coupar F, Pollock A. Motor recovery after stroke: a systematic review[J]. Lancet Neurol, 2009, 8(8):741—754.
- [11] Neckel ND, Blonien N, Nichols D, et al. Abnormal joint torque patterns exhibited by chronic stroke subjects while walking with a prescribed physiological gait pattern[J]. J Neuroeng Rehabil, 2008, 5(1):19.
- [12] 王文清,杨晓莲,鞠智卿,等.减重步行训练对老年卒中偏瘫患者步行能力的疗效[J].中国康复医学杂志,2008,23(4):374—375.
- [13] Plummer P, Behrman AL, Duncan PW, et al. Effects of stroke severity and training duration on locomotor recovery after stroke: a pilot study[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2007, 21(2):137—151.
- [14] 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]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2005, 86(4):672—680.
- [15] 徐伟,范金涛,张琳瑛,等.水中运动训练与减重步行训练对卒中偏瘫患者步行能力的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2011,33(6):469—470.
- [16] 顾旭东,吴华,李建华,等.下肢康复机器人系统结合减重平板训练对卒中偏瘫患者步行能力的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2011,33(6):447—450.
- [17] 丁敏,李建民,吴庆文,等.下肢步态康复机器人:研究进展及临床应用[J].中国组织工程学研究及临床康复杂志,2010,14(35):6604—6607.
- [18] 赵雅宁,郝正玮,李建民.下肢康复训练机器人对缺血性卒中早期偏瘫患者步行能力的影响[J].实用医学杂志,2013,29(5):748—750.
- [19] 赵雅宁,郝正玮,李建民.下肢康复训练机器人对缺血性卒中偏瘫患者平衡及步行功能的影响[J].中国康复医学杂志,2012,27(11):1015—1020.
- [20] Aoyagi D, Ichinose WE, Harkema SJ, et al. A robot and control algorithm that can synchronously assist in naturalistic motion during body- weight- supported gait training following neurologic injury[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2007, 15(3):387—400.
- [21] 郝正玮,李建民,赵雅宁,等.Lokomat下肢康复机器人对缺血性卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J].现代预防医学,2013,40(8):1558—1570.
- [22] Schwartz I, Sajin A, Fisher I, et al. The effectiveness of locomotor therapy using robotic-assisted gait training in subacute stroke patients: a randomized controlled trial[J]. Medical Association Journal, 2009, 1(6):516—523.
- [23] Westlake KP, Patten C. Pilot study of Lokomat versus manual-assisted treadmill training for locomotor recovery post-stroke[J]. J Neuroeng Rehabil, 2009, 6(1):18—20.
- [24] Hornby TG, Gampbell 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.
- [25] Hidler J, Nichols D, Pelliccio M, et al. Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke[J]. Neurorehabilitation and Neural Repair, 2009, 23(1):5—13.
- [26] 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.
- [27] 罗红梅,孙立波.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,2009,9(29):2390—2391.
- [28] 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.
- [29] Thrasher TA, Popovic MR. Functional electrical stimulation of walking: function, exercise and rehabilitation[J]. Ann Readapt Med Phys, 2008, 51(6):452—460.
- [30] 金挺剑,叶祥明,林坚,等.强化患侧下肢负重训练对卒中患者平衡与功能性步行能力的影响[J].中国康复医学杂志,2009,24(11):995—998.
- [31] 张娇娇,胡秀枋,徐秀林.下肢康复训练机器人研究进展[J].中国康复理论与实践,2012,8(18):728—730.
- [32] 刘惠林,吕振存.多体位智能化下肢康复机器人对卒中患者下肢运动功能的影响[J].中国康复理论与实践,2013,8(19):722—724.
- [33] 程方,王人成,贾晓红,等.减重步行训练机器人步态规划方法的研究[J].康复医学工程,2008,23(10):916—918.
- [34] 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的应用[J].临床工程,2011,26(3):94—96.