

· 临床研究 ·

踝关节智能牵伸训练对偏瘫患者踝关节生物力学特性及其运动功能和日常生活活动能力的影响

翟晓雪 潘钰 吴琼 李欣 徐泉 杨绯 冯雨桐 张丽春 樊森朝

清华大学附属北京清华长庚医院康复医学科, 清华大学临床医学院, 北京 102218

通信作者: 潘钰, Email: panyu@btch.edu.cn

【摘要】 目的 观察踝关节智能牵伸训练对脑卒中偏瘫患者踝关节生物力学特性、平衡、步行功能和日常生活活动能力的影响。**方法** 将脑卒中后偏瘫患者 18 例按随机数字表法分为试验组和对照组, 每组患者 9 例。2 组患者均接受常规临床药物和常规康复治疗, 在此基础上, 试验组每日增加 20 min 的踝关节智能牵伸训练, 对照组则将常规康复治疗时间延长 20 min。于治疗前、治疗 2 周后(治疗后)对 2 组患者进行踝关节生物力学特性评估[包括踝关节僵硬、主动关节活动度(AROM)、被动关节活动度(PROM)和肌力]和临床量表评分[包括改良 Ashworth 分级(MAS)、Fugl-Meyer 下肢运动评分(FMA-LE)、Berg 平衡量表评定(BBS)、6 分钟步行试验(6MWT)、改良巴氏指数(MBI)]。**结果** 治疗后, 2 组患者的背屈和跖屈肌力、背屈和跖屈 AROM、BBS、FMA-LE 评分较组内治疗前均明显改善, 差异均有统计学意义($P < 0.05$), 且试验组的跖屈 PROM、K 背屈、MBI 较组内治疗前亦显著改善, 差异均有统计学意义($P < 0.05$)。治疗后, 试验组跖屈和背屈肌力分别为(158.44 ± 14.61) N、(130.22 ± 22.12) N, 均显著优于对照组治疗后, 差异均有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** 踝关节智能牵伸训练可有效地降低偏瘫患者踝关节僵硬, 改善其踝关节肌力、关节活动度和日常生活能力。

【关键词】 偏瘫; 智能牵伸; 僵硬; 肌力; 关节活动度; 日常生活活动能力

基金项目:北京市自然科学基金(12018B1003);北京市科技计划课题(Z181100003118004)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.01.006

Ankle stretching can improve stroke survivors' ankle biomechanics, balance, walking and ability in the activities of daily living

Zhai Xiaoxue, Pan Yu, Wu Qiong, Li Xin, Xu Quan, Yang Fei, Feng Yutong, Zhang Lichun, Fan Senchao

Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, Tsinghua University, Beijing 102218, China

Corresponding author: Pan Yu, Email: panyu@btch.edu.cn

【Abstract】 Objective To observe the effect of ankle stretching on ankle biomechanics, balance, walking ability and ability in the activities of daily living among stroke survivors. **Methods** Eighteen hemiplegic stroke survivors were randomly divided into an experimental group ($n=9$) and a control group ($n=9$). In addition to routine medication and rehabilitation training, the experimental group received 20 minutes of ankle joint stretching daily while the control group underwent an additional twenty minutes of routine rehabilitation training. Before and after the treatment, both groups' ankle joint stiffness (K), muscle strength, active range of motion (AROM) and passive range of motion (PROM) were evaluated. They were also assessed using the modified Ashworth scale (MAS), the Fugl-Meyer lower extremity assessment (FMA-LE), the Berg balance scale (BBS), the 6-minute walking test (6MWT) and the modified Barthel Index (MBI). **Results** After two weeks of treatment significant improvement was observed in the AROM and muscle strength of both groups in dorsiflexion and plantarflexion. The average BBS and FMA-LE scores of both groups had also improved significantly. Significant improvement in the average PROM of plantarflexion and the K of dorsiflexion, as well as in average MBI score was observed only in the treatment group. After two weeks the treatment group's average muscle strength in plantarflexion and dorsiflexion was significantly better than the control group's. **Conclusions** Stretching can reduce ankle stiffness, improve the range of motion, muscle strength, and ability of in the activities of daily living after a stroke.

【Key words】 Hemiplegia; Stretching; Stiffness; Muscle strength; Range of motion; Activities of

daily living

Funding: Beijing Natural Science Foundation (program 12018B1003); a Beijing Science and Technology Plan project (program Z181100003118004)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2021.01.006

踝关节功能障碍是影响脑卒中后偏瘫患者步行的重要因素之一^[1],常表现为足下垂合并足内翻。据统计,约 20% 偏瘫患者存在踝关节功能问题^[2]。踝关节作为人体姿势控制的一个微调枢纽,对维持平衡有着极其重要的意义,而足尖下垂和足底部内翻可引起足底不能有效地接触地面,重心不能有效地前移,从而导致步行功能障碍^[3]。研究表明,踝关节智能牵伸装置可用于牵伸踝关节和评估治疗效果^[4],且踝关节智能牵伸训练可扩大脑卒中、脑瘫、多发性硬化患者的踝关节活动度,提高其肌力和平衡功能^[5]。本研究通过对偏瘫患者进行踝关节智能牵伸训练,观察其治疗前、后踝关节生物力学特性的改变,分析踝关节智能牵伸训练对偏瘫患者平衡、步行功能和日常生活活动能力的影响。

资料与方法

一、一般资料和分组

纳入标准:①符合第四届全国脑血管病会议通过的诊断标准,并经头颅 CT 或 MRI 确诊;②年龄 18~75 岁,首次发病,病程在 1~6 个月;③生命体征稳定,无认知障碍,言语功能障碍,配合评定与治疗;④病灶为颈内动脉系统,存在单侧肢体活动障碍,下肢 Brunnstrom 分期 $\geq$ III 期,下肢改良 Ashworth 分级 1~2 级,能够在有或无辅助装置下睁眼维持静态站立至少 1 min,功能性步行分级(functional ambulation classification, FAC) $\geq$ 2 级;⑤自愿参与本试验并签署知情同意书。

排除标准:①意识或精神心理障碍,癫痫发作尚未控制,以及有严重脏器功能不全者;②脊柱关节或下肢关节活动度不足;③存在小脑或前庭受损导致的平衡功能障碍;④需要长期服用抗眩晕药、镇静安眠药,不能停药者;⑤其它原因不能配合治疗或检查者。

选取 2019 年 3 月至 2019 年 8 月在北京清华长庚医院康复医学科住院治疗并符合上述标准的脑卒中后偏瘫患者 20 例,按随机数字表法将其分为试验组和对照组,每组患者 10 例(2 组各有 1 例患者因病情变化

脱落)。2 组患者的年龄、性别、病变性质、病程、偏瘫侧别等一般资料经统计学分析,差异均无统计学意义($P>0.05$),详见表 1。本研究经北京清华长庚医院医学伦理委员会审批(审批号 18172-0-01)。

二、治疗方法

2 组患者入院后均接受常规的药物治疗和常规康复治疗,包括关节活动度、肌力、诱发主动运动、站立训练、平衡训练、负重训练、步行训练等,每天 2 次,每次 30 min,每周治疗 5 d,连续治疗 2 周。在以上治疗方案的基础上,试验组增加踝关节智能牵伸训练,每日 1 次,每次 20 min,每周治疗 5 d,连续治疗 2 周;对照组则将常规康复训练每日延长 20 min,每日 1 次,每周治疗 5 d,连续治疗 2 周。

踝关节智能牵伸训练采用北京产 FSM-C-AN 型踝关节智能评估训练仪,智能牵伸装置采用数字信号处理器(digital signal processor, DSP)实现速率回路控制,通过读取关节位置和阻力矩来控制相应的牵伸速率。牵伸速率与上述阻力矩成反比,以此来控制牵伸速率。接近关节活动度的末端时,阻力增大逐渐减慢电机,相应的肌肉肌腱得到缓慢和安全的牵伸^[6]。训练时选择被动牵伸模式,被动牵伸至踝关节背屈末端,维持 10 s 后,再牵伸至跖屈末端,循环进行。训练时需注意,在全范围关节活动度内安全地牵伸踝关节,每次牵伸均达到特定峰值阻力矩为止(背屈 10 Nm,跖屈 -3 Nm),根据阻力矩控制牵伸的速率。

三、评定方法

治疗前和治疗 2 周后(治疗后)由同一名经规范化培训的康复治疗师对 2 组患者于双盲状态下进行评估,评定内容包括踝关节生物力学特性评估和临床量表评分。

(一)生物力学特性评估

1. 僵硬度(Nm/°):患者屈髋 90°,屈膝 10°至 20°,舒适坐于座椅上。将智能牵伸系统调于被动牵伸模式,牵伸角速度为:5°/s,被动牵伸踝关节至背屈、跖屈末端,根据角度-力矩曲线,计算背屈、跖屈时踝关节僵硬度。国际通用计算公式:僵硬度 $K=\Delta$ 力矩/ Δ 角度

表 1 2 组患者一般资料

组别	例数	性别(例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	病变性质(例)		平均病程 (d, $\bar{x}\pm s$)	脑损伤侧别(例)	
		男	女		脑出血	脑梗死		左侧	右侧
对照组	9	8	1	65.56 $\pm$ 6.67	0	9	48.78 $\pm$ 32.06	5	4
试验组	9	7	2	58.56 $\pm$ 9.11	0	9	95.67 $\pm$ 84.03	6	3

($\Delta T/\Delta\theta$), ΔT 是指踝关节角度变化时产生力矩的增量,随着 $\Delta\theta$ 变得无限小,僵硬度接近特定踝位置处的力矩-角度曲线切线的斜率。

2.关节活动度(range of motion,ROM)和肌力:采用美国 Hoggan MicroFET3 便携式肌力测试和关节活动度计(Hoggan Health Industries, Inc USA)测量肌力和关节活动度[包括主动关节活动度(active range of motion,AROM)和被动关节活动度(positive range of motion,PROM)]。

(二)临床量表评分

1.Fugl-Meyer 下肢运动评分(Fugl-Meyer assessment lower extremity, FMA-LE)^[7]:采用简化 Fugl-Meyer运动功能量表下肢部分进行评估,评定偏瘫侧下肢运动功能,共 17 项,运动总分为 34 分,评分越低说明下肢运动功能障碍程度越严重。

2. Berg 平衡量表评定(Berg balance scale, BBS)^[8]:BBS 是评估脑卒中患者平衡能力最主要的量表之一,共 14 项,总分最高为 56 分,得分越高则平衡功能越好。

3.改良 Ashworth 分级(modified Ashworth scale, MAS)^[9]:共有 0~4 级,级别越高则肌张力越强。

4.6 min 步行试验(6 minutes walking test, 6MWT):选取受试者在 6 min 所能行走的距离为参数,共测量 3 次,取其平均值,可反映步行耐力和完成日常体力活动的功能代偿能力水平。

5.改良巴氏指数(modified Barthel index, MBI)^[10]:满分 100 分,日常生活活动包括:大便、小便、修饰、用厕、吃饭、转移、穿衣、上下楼、洗澡共 10

项,得分越高说明独立日常生活活动能力越强。

四、统计学方法

应用 SPSS 21.0 版统计软件进行数据分析。数据采用($\bar{x}\pm s$)表示,数据分析前经 K-S 正态性检验和方差齐性检验,组内比较采用配对样本 t 检验,组间比较采用独立样本 t 检验,计数资料采用 χ^2 检验。以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、生物力学特性评估

治疗前,2 组患者的踝关节僵硬度、关节活动度和肌力组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。治疗后,2 组患者踝关节背屈和跖屈肌力、背屈和跖屈 AROM 较组内治疗前均明显改善,差异均有统计学意义($P<0.05$);试验组治疗后的踝关节跖屈 PROM、K 背屈较组内治疗前亦明显改善,差异均有统计学意义($P<0.05$),且试验组治疗后的踝关节跖屈和背屈肌力较对照组治疗后亦显著改善,差异均有统计学意义($P<0.05$),详见表 2。

二、临床量表评分

治疗前,2 组患者的 MAS、FMA-LE、BBS、6MWT、MBI 组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。治疗后,2 组患者的 FMA-L、BBS 评分较组内治疗前均明显改善,差异均有统计学意义($P<0.05$);试验组治疗后的 MBI 较组内治疗前明显改善,差异有统计学差异($P<0.05$)。治疗后,2 组患者 MAS、FMA-LE、BBS、6MWT、MBI 组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$),详见表 3。

表 2 2 组患者治疗前、后生物力学特性指标评分比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	背屈 AROM (°)	背屈 PROM (°)	跖屈 AROM (°)	跖屈 PROM (°)	背屈肌力 (N)	跖屈肌力 (N)	K _{背屈} (Nm/°)	K _{跖屈} (Nm/°)
试验组									
治疗前	9	7.33±5.24	15.44±2.35	17.33±10.92	35.00±3.16	91.00±37.04	133.11±23.92	1.65±0.47	0.26±0.12
治疗后	9	10.44±4.33 ^a	16.78±1.39	22.44±9.72 ^a	37.00±2.92 ^a	130.22±22.12 ^{ab}	158.44±14.61 ^{ab}	1.20±0.47 ^a	0.20±0.04
对照组									
治疗前	9	6.22±5.04	15.11±3.98	14.22±13.93	38.22±4.94	62.11±43.21	107.67±36.94	1.29±0.46	0.17±0.06
治疗后	9	7.44±5.39 ^a	15.44±4.28	16.89±14.34 ^a	38.44±5.29	79.89±44.43 ^a	124.11±37.30 ^a	1.19±0.63	0.21±0.06

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$;与对照组治疗后比较,^b $P<0.05$

表 3 2 组患者治疗前、后临床量表评分比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	MAS	FMA-LE	BBS	6MWT(m)	MBI
试验组						
治疗前	9	1.33±0.50	25.78±4.94	38.33±16.49	72.44±92.70	55.00±15.41
治疗后	9	1.00±0.00	28.44±4.00 ^a	41.44±16.05 ^a	89.44±125.29	71.11±14.09 ^a
对照组						
治疗前	9	1.11±0.33	22.22±5.47	37.11±9.28	38.78±62.69	65.00±21.06
治疗后	9	1.00±0.00	25.78±6.57 ^a	41.67±8.85 ^a	50.22±70.19	68.89±18.16

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$

讨 论

本研究结果显示,经踝关节智能牵伸训练和常规康复治疗 2 周后,试验组患者的踝关节背屈和跖屈肌力、背屈和跖屈主动关节活动度、跖屈被动关节活动度、踝关节背屈僵硬、平衡功能、下肢运动功能和日常生活活动能力较组内治疗前均显著改善,且与常规康复治疗相比,试验组患者的踝关节跖屈和背屈肌力均显著提高。

脑卒中后踝关节功能障碍是高位中枢神经损伤造成的运动障碍,当中枢神经系统损伤后,原本被高级中枢抑制的脊髓水平的原始反射释放,在功能活动中常以特定的“痉挛模式”呈现,即上肢屈曲模式和下肢伸展模式。研究表明,阳性支撑反射的释放可使脑卒中患者出现足跖屈^[6,11],而 Chan 等^[12]通过研究提出,踝关节痉挛也与肌肉纤维和肌腱的物理特性改变有关。长期的制动可使其小腿前、外侧肌群因激活不充分,而导致偏瘫患者支配足背屈的肌肉出现废用性萎缩,足背屈肌和跖屈肌的肌肉力量失衡,加重足下垂和内翻^[11]。足内翻可导致患者踝关节不稳,足下垂可使患足廓清困难,造成低效的划圈步态,影响患者的步行速度和稳定性。踝关节作为人体姿势控制的一个微调枢纽,对维持姿势的稳定性意义重大。研究表明,在稳定平面上,人体主要通过踝关节策略来调整姿势和维持平衡,如人们在平地上的站立和步行^[13]。脑卒中患者偏瘫后由于患侧小腿肌群的激活能力差,踝关节本体感觉减退,踝关节姿势平衡控制策略也随之部分缺失,大多数患者会采用髋关节策略来代偿^[14]。由此可见,踝关节功能障碍影响了患者的平衡和步行功能。

目前,临床上降低踝关节痉挛的办法包括:运动疗法、电动起立床、踝足矫形器、物理因子治疗、口服降低张力药物、局部肉毒素注射等^[11,15]。其中,软组织牵伸是降低痉挛最常用的方法之一^[16]。牵伸训练是应用力学原理,通过人工手法或器械,按功能所需扩大关节的活动范围,进行持续的牵拉,使肌肉和软组织得到持续牵伸,其张力随之减小,称为“应力性松弛”,其目的在于改善软组织的伸展性和肌肉特性^[17]。目前,手法牵伸治疗常因治疗强度和时间不足、人工牵伸费力费时、牵伸程度依赖于治疗师的经验和主观“终末感觉”等,使得牵伸效果不能长久保持,其应用和疗效也存在一定的局限性。

踝关节智能牵伸装置采用高级数字信号处理器(digital signal processor, DSP)控制电机速率、力矩和位置,通过读取关节位置和阻力矩来控制相应的牵伸速率,从而实现在全 ROM 内安全地牵伸踝关节。治疗过程中该装置可根据患者不同的情况,如肌张力、关节

僵硬度和 ROM 等,针对踝关节挛缩或痉挛,定制拉伸参数,进行智能和安全的被动牵伸。即越接近 ROM 末端,阻力矩越大,其牵伸速度越慢,从而充分牵伸相应的肌肉肌腱,并在 ROM 末端时维持一段时间使得应力松弛发生^[18]。踝关节智能评估训练系统可实时描绘出力矩-角度曲线,并计算踝关节僵硬。此方法类似于采用等速测试系统进行实验室评定力矩-角速度斜率,以往的研究也应用该指标作为量化痉挛的依据,具有较好敏感性^[19]。本研究发现,通过踝关节智能牵伸装置可有效地改善偏瘫患者背屈时踝关节的僵硬,说明踝关节智能牵伸训练可以改变踝关节的生物力学特性,并进一步扩大踝关节活动度和肌力,减轻足下垂和内翻。

既往已有研究将踝关节智能牵伸训练应用于脑瘫、偏瘫或多发性硬化等神经系统疾病患者的治疗。Wu 等^[20]将踝关节智能牵伸训练应用于痉挛性脑瘫儿童,结果发现,受试者背屈 PROM、AROM 增加,跖屈肌力量增强,踝部肌肉痉挛减轻,平衡功能和下肢运动功能改善,6MWT 增加;Lee 等^[21]对多发性硬化患者 6 例进行为期 6 周,每周 3 次的被动牵伸和主动运动的踝关节智能牵伸训练,结果显示,6 例患者的背屈 AROM,背屈和跖屈肌力,运动和平衡能力均显著改善,本体感觉也呈改善趋势;Waldman 等^[22]对偏瘫患者 10 例进行了 6 周的踝关节智能牵伸治疗,结果发现,受试患者的背屈 PROM、跖屈肌力、MAS、BBS、和患侧负重时间较治疗前均显著改善。

本研究还发现,偏瘫患者踝关节智能牵伸训练可以降低踝关节的僵硬,改善踝关节周围肌力和日常生活能力,这表明踝关节智能牵伸训练对于偏瘫患者踝关节功能的恢复和帮助其回归家庭具有重要意义。但本研究中,受试组和对照组治疗后的平衡和步行功能并没有统计学差异,分析原因如下,第一,偏瘫患者平衡障碍涉及机制较多,除踝关节局部生物力学问题,还存在前庭功能和本体感觉问题,单一训练较难短时间改善平衡功能,且平衡量表敏感性欠佳,难以反映平衡功能的微小变化,今后还需采用更敏感的评估方法以观察其对平衡功能的影响;第二,偏瘫患者步行功能的恢复涉及下肢肌力、平衡、负重能力、肌张力等多种因素,本研究样本量较小,且治疗和随访时间较短,多种因素均可能影响患者步行功能恢复观察,进一步研究需扩大样本量,延长治疗时间和随访时间,对影响步行功能的多因素进行分析,以消除研究偏倚。

综上所述,踝关节智能牵伸训练可有效地改善偏瘫患者踝关节僵硬,提高踝关节肌力,扩大踝关节活动度,改善其日常生活活动能力,在偏瘫患者踝关节功能康复方面有一定推广价值。

参 考 文 献

- [1] Barnes MP. Medical management of spasticity in stroke[J]. Age Ageing, 2001, 30(1):13-16.
- [2] BurrIDGE J, Taylor P, Hagan S, et al. The effects of common peroneal stimulation on the effort and speed of walking: a randomized controlled trial with chronic hemiplegic patients[J]. Clin Rehabil, 1997, 11(3):201-210.
- [3] 瓮长水,毕胜,于增志,等. 影响脑卒中偏瘫患者自由和最大步行速度的主要功能损害因素[J].中国组织工程研究, 2004, 8(31): 6813-6815. DOI: 10.3321/j.issn:1673-8225.2004.31.001.
- [4] Zhang LQ, Chung SG, Bai Z, et al. Intelligent stretching of ankle joints with contracture/spasticity[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2002, 10(3):149-157. DOI: 10.1109/TNSRE.2002.802857.
- [5] Yeh CY, Chen JJJ, Tsai KH. Quantitative analysis of ankle hypertonia after prolonged stretch in subjects with stroke[J]. J Neurosci Methods, 2004, 137(2):305-314.
- [6] 任文涛,房冬梅. 脑卒中偏瘫病人足内翻的治疗进展[J].当代体育科技, 2018, 8(11):9-11. DOI: 10.16655/j.cnki.2095-2813.2018.11.009.
- [7] Sullivan KJ, Tilson J K, Cen S Y, et al. Fugl-Meyer assessment of sensorimotor function after stroke: standardized training procedure for clinical practice and clinical trials[J]. Stroke, 2011, 42(2):427-432. DOI:10.1161/STROKEAHA.110.592766.
- [8] 张婷婷,姜建萍,谢江波,等.肌内效贴联合平衡功能训练对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能和平衡功能的影响[J].中华物理医学与康复杂志, 2019, 41(11):847-849. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.11.011.
- [9] 曾杰,卫霄青,徐晓杰,等.表面肌电信号与脑瘫患儿肌力、肌张力间的相关性分析[J].中华物理医学与康复杂志, 2017, 39(9):704-705. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.09.018.
- [10] 闵瑜,吴媛媛,燕铁斌.改良 Barthel 指数(简体中文版)量表评定脑卒中患者日常生活活动能力的效度和信度研究[J].中华物理医学与康复杂志, 2008, 30(3):185-188. DOI: 10.3321/j.issn:0254-1424.2008.03.010.
- [11] 吴建贤,江炎,洪永锋,等.踝关节持续被动运动治疗脑瘫足外翻的临床疗效[J].中华物理医学与康复杂志, 2020, 42(1):44-49. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.01.011.
- [12] Chan DY, Chan CC, Au DK. Motor relearning programme for stroke patients: a randomized controlled trial [J]. Clin Rehabil, 2006, 20(11):1017-1020.
- [13] Peterka RJ, Loughlin PJ. Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control[J]. J Neurophysiol, 2004, 91(1):410-423. DOI: 10.1152/jn.00516.2003.
- [14] Tyson SF, Marie H, Jay C, et al. Balance disability after stroke[J]. Phys Ther, 2006, 86(1):30-38. DOI: 10.1093/ptj/86.1.30.
- [15] 谢光柏,姜洪福.早期康复治疗对急性脑血管意外偏瘫患者下肢运动功能的影响[J].中华物理医学与康复杂志, 2001, 23(2):102-104. DOI: 10.3760/j.issn:0254-1424.2001.02.011.
- [16] Dombrov ML, Sandok BA, Basford JR. Rehabilitation for stroke: a review[J]. Stroke, 2007, 17(3):363-369. DOI: 10.1161/01.STR.17.3.363.
- [17] Novak I, McIntyre S, Morgan C, et al. A systematic review of interventions for children with cerebral palsy: state of the evidence [J]. Dev Med Child Neurol, 2013, 40(10):885-910. DOI: 10.1111/dm-cn.12246.
- [18] Zhang LQ, Chung SG, Bai Z, et al. Intelligent stretching of ankle joints with contracture/spasticity [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2002, 10(3):149-157.
- [19] Firozbakhsh KK, Kunkel CF, Scremin AM, et al. Isokinetic dynamometric technique for spasticity assessment [J]. Am J Phys Med Rehabil, 1993, 72(3):379-385.
- [20] Wu YN, Hwang M, Ren Y, et al. Combined passive stretching and active movement rehabilitation of lower-limb impairments in children with cerebral palsy using a portable robot [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2011, 25(4):378. DOI:10.1177/1545968310388666.
- [21] Lee Y, Chen K, Ren Y, et al. Robot-guided ankle sensorimotor rehabilitation of patients with multiple sclerosis[J]. Mult Scler Relat Disord, 2017, 11:65-70. DOI: 10.1016/j.msard.2016.12.006.
- [22] Waldman G, Yang CY, Ren Y, et al. Effects of robot-guided passive stretching and active movement training of ankle and mobility impairments in stroke [J]. NeuroRehabilitation, 2013, 32(3):625-634. DOI: 10.3233/NRE-130885.

(修回日期:2020-12-07)

(本文编辑:阮仕衡)