

# 下肢外骨骼机器人系统改善脑卒中患者步行功能研究进展

王艳 吴珊红 宫子涵

**【摘要】** 随着康复医学工程的蓬勃发展,下肢外骨骼机器人系统在脑卒中患者步行训练中的作用备受重视。本文拟对应用于脑卒中不同时期步行训练的下肢外骨骼机器人系统进行分类,总结其改善步行功能的作用机制,综述其对脑卒中不同时期患者步行功能的影响、目前挑战及未来发展方向,以期推动下肢外骨骼机器人系统的临床应用。

**【关键词】** 卒中; 下肢; 机器人; 外骨骼康复器; 步行; 综述

## Advances on lower limb exoskeleton robotic systems to improve walking function of stroke patients

WANG Yan<sup>1</sup>, WU Shan-hong<sup>2</sup>, GONG Zi-han<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rehabilitation Center, The Second Affiliated Hospital of Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin 150001, Heilongjiang, China

<sup>2</sup>Grade 2021, Graduate School, Second School of Clinical Medicine, Heilongjiang University of Chinese Medicine, Harbin 150040, Heilongjiang, China

Corresponding author: WANG Yan (Email: swallow-1113@163.com)

**【Abstract】** With the booming development of rehabilitation medicine engineering in recent years, the role of lower limb exoskeletal robotic systems in the treatment of walking function recovery of post-stroke has received much attention. This paper intends to classify and summarize the lower limb exoskeletal robotic systems used for walking function recovery at different periods of stroke, summarize the mechanism of improving walking function, and review the impact of lower limb exoskeletal robotic systems on the walking function of stroke patients at different periods, current challenges and future development direction, in order to promote the clinical application of lower limb exoskeletal robotic systems.

**【Key words】** Stroke; Lower extremity; Robotics; Exoskeleton device; Walking; Review

This study was supported by Research Project of Heilongjiang University of Chinese Medicine "Excellent Innovative Talent Support Program" (No. 2018RCL10).

**Conflicts of interest:** none declared

随着人口老龄化进程的加速,脑卒中发病率和病残率逐年升高,约 2/3 的脑卒中患者步行受限,跌倒风险较高,影响日常生活活动能力<sup>[1]</sup>,因此尽早予以康复训练显得尤为重要。我国康复医疗资源缺乏,尤其是经济欠发达地区康复治疗师短缺且费用

昂贵,一般家庭难以支撑;康复治疗主要依据康复治疗师经验,通常采取“一对多”的传统康复模式,缺乏针对性,因此高效、精准的康复训练是未来发展方向<sup>[2]</sup>。下肢外骨骼机器人系统作为医用机器人系统的分支,以人体运动学和人体生物力学为基础,与工科、计算机科学等有机结合,突显人机协同智能化的最大特点。对于下肢功能障碍的脑卒中患者,外骨骼机器人系统可增强中枢神经系统与下肢之间的功能连接,改善步行功能。与传统康复模式相比,下肢外骨骼机器人系统在数字化信息技术支持下的步行训练更符合人体生物力学,更具重复性,可以实现康复治疗方案的标准化、高效化,同时

doi: 10.3969/j.issn.1672-6731.2023.01.005

基金项目:黑龙江中医药大学“优秀创新人才支持计划”科研项目(项目编号:2018RCL10)

作者单位:150001 哈尔滨,黑龙江中医药大学附属第二医院康复中心(王艳);150040 哈尔滨,黑龙江中医药大学研究生院第二临床医学院 2021 级(吴珊红,宫子涵)

通讯作者:王艳,Email:swallow-1113@163.com

可以更好识别患者的运动意图,具有高智能性,促进受损脑区的功能代偿,有利于改善步态;该机器人系统内含多种训练模式,可以满足脑卒中不同时期患者,更具针对性。目前尚无步行障碍的脑卒中患者常用下肢外骨骼机器人系统的总结报道。本文拟综述常用的下肢外骨骼机器人系统、治疗机制及其在脑卒中不同时期患者中的应用进展,分析目前挑战并展望未来发展方向,以促进下肢外骨骼机器人系统的临床应用。

### 一、常用下肢外骨骼机器人系统

目前常用下肢外骨骼机器人系统主要分 3 类,即减重步行类、康复训练类和辅助步行类。

1. 减重步行类下肢外骨骼机器人系统 该机器人系统由悬吊系统、步行矫正器、跑台组成。悬吊系统的主要功能是减轻肢体重量对步行的阻碍;步行矫正器主要纠正异常步态;跑台带动患者下肢进行重复性步行训练。常用的减重步行类机器人系统包括 Lokomat、LokoHelp、Alex 等。(1) Lokomat: 由苏黎世联邦工业大学医学院与瑞士 Hocoma 公司于 2001 年共同研发,是一款典型的用于步行训练的下肢外骨骼机器人系统(图 1)<sup>[3]</sup>。通过力学传感器收集患者下肢关节位置、角度、压力、扭矩等物理信息,以判断患者运动意图,并将收集的信息传递至控制系统,分析规划步态模式,实现人机交互,由驱动系统高效智能完成步行任务;同时还可以根据患者肌力、关节扭矩等参数评估并反馈步行状态,实现训练再评估的闭环良性循环,进而制定更合理的康复训练计划。Lokomat 作为改善脑卒中患者步行功能的辅助工具,可以提供安全的步行环境和减重需求<sup>[4]</sup>,脑卒中早期即可通过驱动装置带动下肢进行生理性步行训练,从而为步行功能恢复打下良好基础。(2) LokoHelp: 系德国 Woodway 公司于 2006 年研发的下肢外骨骼机器人系统,辅助患者主动运动,用于基础步态的康复训练。该机器人系统可调节跑台坡度,从而减轻体力消耗,有助于脑卒中后支撑力较弱患者实现早期站立和步行<sup>[5]</sup>。(3) Alex: 系美国特拉华大学于 2010 年研发的下肢主动运动外骨骼机器人系统。该机器人系统主要依靠力场控制器调节助力大小,实现按需助力,应用于脑卒中患者的步行康复训练时,其步态模式更接近生理性步态,并显著增快步速、增加步长<sup>[6]</sup>。

2. 康复训练类下肢外骨骼机器人系统 该机器人系统主要由计算机控制系统、传感系统、动力外



图 1 Lokomat 下肢外骨骼机器人系统<sup>[3]</sup>

Figure 1 Lokomat lower limb exoskeleton robot<sup>[3]</sup>.

骨骼组成,部分机器人配备手杖等辅助工具。与减重步行类机器人系统相比,康复训练类机器人系统的训练场所较灵活,且无需借助运动平板和减重系统,可以最大限度模拟日常生活环境。该机器人系统可以基于步态控制系统模拟正常步行周期,并根据患者运动功能进行髌关节与膝关节分离运动,调节肌张力,缓解肌肉痉挛,进而改善步态。常用的康复训练类机器人系统包括 Ekso GT<sup>[7]</sup>、AiLegs、EXO-H3 等。(1) Ekso GT: 系美国 Ekso Bionics 公司于 2012 年研发的一款可穿戴式下肢外骨骼机器人系统(图 2)<sup>[7]</sup>。该机器人系统应用范围广泛,续航时间长达 24 小时,适用于脑卒中或其他因素导致的运动障碍,并可根据患者实际情况和需求调节外骨骼辅助水平<sup>[8]</sup>,实现精准康复。与传统康复模式相比,Ekso GT 可以使脑卒中患者步速增快、步长增加,并促进生理性步态的恢复<sup>[9]</sup>。(2) AiLegs: 由北京航空航天大学机器人研究所于 2018 年研发,是国内唯一专业医用外骨骼机器人系统。该机器人系统根据步态监测分析系统、动态足底压力检测分析系统预判患者运动轨迹,在辅助步行的同时记录步态参数和足底压力,可以一定程度实现人机协同训练,有助于康复治疗师及时调整康复策略,目前主要用于脑卒中、脊髓损伤、肌无力患者的步行训练。(3) EXO-H3: 由西班牙 Technaid 公司于 2019 年研发,主要用于脑卒中、脊髓损伤、颅脑创伤致下肢运动障碍患者。该机器人系统质量较轻,框架灵活,可搭配拐杖、助行架等进行辅助步行训练,且具备



图 2 Ekso GT 下肢外骨骼机器人系统<sup>[7]</sup>

Figure 2 Ekso GT lower limb exoskeleton robot<sup>[7]</sup>.

图 3 Indego 下肢外骨骼机器人系统<sup>[11]</sup>

Figure 3 Indego lower limb exoskeleton robot<sup>[11]</sup>.

WiFi、蓝牙等通信功能,可通过手机调整步速和助力大小等参数,更具针对性<sup>[10]</sup>。

3. 辅助步行类下肢外骨骼机器人系统 与康复训练类机器人系统相比,辅助步行类机器人系统的材质更轻便,更易穿脱,舒适性更强。该机器人系统的主要作用是功能代偿,即对于认知功能良好的患者,在可安全操控机器人的前提下辅助完成独立步行、上下楼梯等日常生活活动,包括 ReWalk、Indego<sup>[11]</sup>、HAL 等。(1)ReWalk:系以色列 ReWalk 公司于 2012 年研发的下肢外骨骼机器人系统。通过力学传感器感知重心位置,模拟人体生理性步行模式,辅助患者完成站立、步行、上下楼梯等日常生活活动<sup>[12]</sup>,并根据实际情况实时控制步速,家庭和社区中均可使用。相较于踝足矫形器的常规步行训练,ReWalk 可以辅助脑卒中患者直立步行,并减少步行过程中能量消耗,加快步速、延长步行距离<sup>[13]</sup>。(2)Indego:由美国范德堡大学于 2013 年设计并研发(图 3)<sup>[11]</sup>,是目前质量最轻的动力外骨骼机器人系统,支撑装置包括腕部、机械腿支架和前臂拐杖,其中前臂拐杖的设计具有防摔倒功能,可体现其安全性<sup>[14]</sup>。该机器人通过控制系统整合并处理传感器采集的患者位置姿势、身体倾斜角度等力学参数,

以控制机器启停并调整运动模式,充分体现其智能性;但其对患者运动功能要求较高,至少一侧上肢保留 4/5 运动功能,且不适用上下楼梯、跑跳等高强度运动<sup>[15]</sup>。(3)HAL:由日本筑波大学于 2004 年研发,为全球首个获得安全认证的外骨骼机器人系统<sup>[16]</sup>。该机器人系统的最大特点为可实现人机交互以判断患者运动意图,即大脑发送运动指令产生肢体运动时,传感系统采集运动过程中外溢的表面肌电信号(sEMG),控制系统分析传感器的反馈数据,以制定步行训练模式;再由驱动系统通过控制机器人运动以最大程度匹配人体骨骼肌肉系统的运动模式,辅助患者做出符合人体生物力学的生理性运动。相较于应用物理传感器进行人机交互过程中“力反馈”滞后性导致某些动作出现阻力感,生物量传感器具有一定超前性,但该传感器需要贴敷人体皮肤表面,易滑落或发生位置改变等而影响测量的准确性。

二、下肢外骨骼机器人系统改善脑卒中患者步行功能的作用机制

下肢外骨骼机器人系统对脑卒中患者步行功能的改善作用以疾病早期各种感觉的正确输入为基础,涉及下肢肌力的保持、平衡功能的训练、中枢整合能力的提高、运动模式的重塑等,通过大量重复、精确的运动训练使脑卒中患者恢复步行功能。但其作用机制尚不明确,目前较公认的理论或学说主要包括基于中枢模式发生器理论、神经系统可塑论与功能重组、运动控制“动力系统”学说、强制性主动使用理论。(1)基于中枢模式发生器理论:中枢模式发生器指产生节律性动作的神经回路,由脑干和脊髓神经元相互连接形成,通过神经肌肉耦联和运动反馈系统使神经元之间相互抑制而发出稳定的周期信号,在无意识控制的情况下产生节律性肌肉动作;同时,高级神经中枢的参与可提高运动模式的可塑性、准确性和协调性。基于这一理论,下肢外骨骼机器人系统通过数学建模方式形成下肢各关节运动轨迹,采用重复的生理性运动训练,改善步态,形成正确的步行模式。(2)神经系统可塑论与功能重组:神经系统具有可塑性,中枢神经系统损伤后大脑通过“突触修剪”以重建新的神经回路。下肢外骨骼机器人系统通过重复的生理性运动训练定向诱导脑卒中患者神经元内部结构改变,形成新的突触连接,有助于恢复独立步行功



能<sup>[17]</sup>。(3)运动控制“动力系统”学说:脑卒中后大脑结构的病理性改变并不意味着其功能完全丧失。通过反复感受正确步态、增加感知觉输入以增强主动运动,可以促进神经电生理信号传导,提高运动控制能力,促进步行功能的恢复。(4)强制性主动使用理论:中枢神经系统损伤后患侧肢体灵活性较差,患者习惯性使用健侧可导致患侧肢体负反馈增强,产生习得性废用。下肢外骨骼机器人系统通过强制性主动运动,激活大脑皮质和脊髓的运动中枢,使健侧皮质支配的下肢区域扩大,同时促进患侧皮质产生新的募集,维持患侧下肢肌力,增强患侧下肢恢复潜力<sup>[18]</sup>,促进步行功能的恢复。

### 三、下肢外骨骼机器人系统对脑卒中不同时期患者步行功能的作用

脑卒中不同时期的神经功能、运动功能及就诊目的和需求不同。因此,应科学选择下肢外骨骼机器人系统并优化其辅助训练的康复策略,以促进神经功能的代偿、神经网络的连接、肌力的恢复,以重建生理性运动模式,改善患者步行功能。

1. 脑卒中急性期 处于急性期(通常发病后 1~2 周, Brunnstrom 分期 1~2 期)的脑卒中患者患侧肢体肌张力已开始恢复,出现屈肌伸肌的共同运动。常规康复训练主要为良肢位摆放、物理治疗等,但鲜有研究关注这一时期的规范化步行训练。马亚新<sup>[19]</sup>对 20 例首次发病、病程(14.32±2.51)天的脑卒中患者进行连续 6 周(30 min/次、5 次/周)的 Lokomat 辅助步行训练,结果显示, Lokomat 除改善患者步行功能外,还可防止跌倒。 Khalili 等<sup>[20]</sup>发现,当脑卒中患者肢体将超出稳定极限时, Lokomat 可通过平衡恢复技术使控制系统切换至安全坠落控制模式,避免头部碰撞,减缓髋部冲击速度,从而减少肢体受伤风险。 Tan 等<sup>[21]</sup>的研究显示, HAL 辅助步行训练连续 3 周(20 min/次、3 次/周)后,脑卒中急性期患者 Fugl-Meyer 运动量表(FMA)和功能独立性评价(FIM)评分增加,步速和步频增快,患侧髋关节活动范围扩大。上述两款机器人系统通过模拟正常步行周期,促进早期正确感觉的输入,维持下肢肌力,刺激患者重复主动步行,对早期步行模式的重塑具有积极意义;同时还可降低循环系统、呼吸系统和泌尿系统等并发症风险,符合脑卒中急性期康复目标。上述研究提示,应用于脑卒中急性期的下肢外骨骼机器人系统应具有较高的安全性且人机交互设计相对完善。由于下肢外骨骼机器人系统应用

于脑卒中急性期患者有严格的适应证,即下肢轻瘫型,可维持自动态平衡,保留部分负重能力,且训练强度不宜过高、训练时间不宜过长;禁忌证为严重心肺疾病、骨折、伤口感染等,因此,临床实践中符合上述标准的脑卒中急性期患者较少,无法得出疾病早期应用下肢外骨骼机器人系统具有积极意义的可靠结论,尚待大样本临床研究的探究。

2. 脑卒中恢复期 脑卒中恢复期的康复目标为抑制肌肉痉挛、促进分离运动、重建生理性运动模式,以及增强运动协调性。与常规康复训练相同,脑卒中恢复期的重点是步行训练,并最大程度与日常生活活动相结合。(1)恢复早期(发病后 3~4 周, Brunnstrom 分期为 2~3 期):一项纳入 80 例发病 4 周内脑卒中患者的随机对照临床试验结果显示,其中 40 例接受减重步行类机器人系统结合高压氧步行训练(45 min/次、6 次/周)的患者训练 8 周后,美国国立卫生研究院卒中量表(NIHSS;  $t = 2.1272, P < 0.05$ )、FMA ( $t = 5.1477, P < 0.05$ )和 Berg 平衡量表(BBS;  $t = 2.0436, P < 0.05$ )评分改善程度均优于常规康复训练患者(40 例),表明下肢外骨骼机器人系统与高压氧结合可以增强中枢神经系统与肢体的功能连接,对改善步行功能具有重要意义<sup>[22]</sup>。(2)恢复中期(发病后 4~12 周, Brunnstrom 分期为 3~4 期):主要应用康复训练类下肢外骨骼机器人系统,以 Ekso GT 最常见。一项针对 36 例发病 3 个月脑卒中患者的随机对照临床试验分别予以常规康复训练(17 例,对照组)以及常规康复训练结合 Ekso GT 辅助步行训练(19 例,机器人组),两组均行 8 周康复训练(45~60 min/d、4~5 d/周),结果显示,机器人组实现独立步行(无辅助步行)的时间更短( $P = 0.030$ )、步速更快( $P = 0.040$ )<sup>[23]</sup>。 Longatelli 等<sup>[24]</sup>对 15 例发病 30~64 天脑卒中患者进行为期 4 周常规康复训练结合 Ekso GT 辅助步行训练(60 min/次,共 20 次),通过记录双侧胫前肌、比目鱼肌、股直肌和半腱肌肌电信号发现,常规康复训练结合 Ekso GT 辅助步行训练有助于恢复准确、协调的节律性肌肉动作,提高肌肉耐力,增快步速,从而为脑卒中恢复期的步行训练打下良好基础。 Høyer 等<sup>[9]</sup>采用 Ekso GT 对 26 例发病 2.5 个月的脑卒中患者进行步行训练(1 h/次、2~3 次/周),持续 3 周后显示出较好疗效,且患者劳累感较少,满意度较高。上述研究提示, Ekso GT 对改善脑卒中恢复中期患者的步速、平衡功能和肌肉耐力具有积极作用,且无严重不良事

件。仅有因绑带过紧、训练时间较长而出现轻微皮肤红肿和磨损,或电极刺激导致皮肤发红、腹股沟中度疼痛、脚部擦伤等的个案报道<sup>[25]</sup>。此外,患者体位转换时有跌倒风险,需两位康复治疗师同时支持,以最大程度保证其安全性。(3)恢复后期(发病后 4~6 个月,Brunnstrom 分期为 5~6 期):包译等<sup>[26]</sup>对发病 3~6 个月的脑卒中患者进行常规康复训练结合 Lokomat 辅助步行训练(30 min/次、5 次/周,连续 4 周),可显著增快步速,改善步态,降低步行疲劳程度。Mizukami 等<sup>[27]</sup>采用 HAL 进行步行训练,对脑卒中恢复后期患者步速、平衡功能的改善均有积极意义。Infarinato 等<sup>[28]</sup>对发病 6 个月内的脑卒中患者进行 Ekso GT 步行训练,并结合上肢康复训练、功能任务练习、肌肉强化、言语治疗和职业康复等常规康复训练,连续 3 周(60 min/次、5 次/周)后发现,联合治疗有利于维持肌力,提高步速,改善步行功能。由此可见,脑卒中恢复期患者一般状况、肌力恢复良好,下肢外骨骼机器人系统的使用频率以及训练时间和频率增加,对患者步速、步行耐力、平衡功能、肌肉协同运动的改善均有积极意义。此外,下肢外骨骼机器人系统辅助步行训练结合常规康复训练和高压氧治疗对改善患者运动功能效果更佳,但尚未发现对改善下肢肌张力和促进下肢分离运动的积极意义。

3. 脑卒中慢性恢复期 脑卒中慢性恢复期亦称后遗症期,通常为发病后 6 个月至 2 年。普遍认为,脑卒中慢性恢复期患者步行功能在相当长时间内无法明显改善,加强代偿性功能训练是这一时期的康复重点。Lokomat 辅助步行训练(2 次/周)结合常规康复训练(3 次/周)连续 6 周,可改善脑卒中慢性恢复期患者步态、平衡功能、认知功能和生活质量<sup>[29]</sup>。Yeung 等<sup>[30]</sup>对 19 例存在足下垂的脑卒中慢性恢复期患者[病程(5.2±3.7)年]进行为期 5 周的双盲随机对照试验,分别予以下肢外骨骼机器人系统搭配踝足矫形器(9 例,机器人组)以及仅予以踝足矫形器(10 例,对照组)进行步行训练(30 min/次,共 20 次),结果显示,无辅助步行条件下,机器人组下肢平衡功能、运动协调性、步速、步行耐力均优于对照组。亦有研究显示,与常规步行训练结合经颅磁刺激(TMS)相比,Ekso GT 结合经颅磁刺激的患者 10 米步行试验(10MWT,  $P < 0.001$ )、Rivermead 移动指数(RMI,  $P = 0.030$ )和起立-行走计时测验(TUGT,  $P = 0.020$ )评分改善更明显。下肢外骨骼机

器人系统有利于增强神经系统可塑性,诱导健侧与患侧大脑半球之间感觉运动整合,增加视觉、触觉、前庭觉和本体感觉输入,改善步行功能<sup>[31-32]</sup>。脑卒中慢性恢复期应用下肢外骨骼机器人系统符合该时期功能性代偿训练的宗旨,打破其应用辅助支具较少、常规康复训练效果较差的瓶颈,为改善患者生活质量、减轻家庭和社会经济负担提供新思路。

四、下肢外骨骼机器人系统的应用局限性及未来研发建议

下肢外骨骼机器人系统的局限性主要包括以下几方面:(1)难以精确模拟步行过程中骨盆、髋关节、膝关节、踝关节运动,缺少水平面旋转和侧弯摆动<sup>[33]</sup>。(2)驱动系统续航能源主要采用蓄电池或内燃机,续航时间不超过 24 小时,限制其应用场景。(3)传感器融合技术不成熟使人机交互、运动意图识别能力较差,技术瓶颈限制其临床应用。(4)多采用捆绑式穿戴,舒适度较差,时间较长可能导致患者血流不畅、肌肉变形,影响传感器定位的精确性。(5)人工智能技术不成熟,需通过大数据采集、磨合,改善建模方式,制定个性化训练模式。(6)科研成本投入较高,价格昂贵,限制其临床推广<sup>[34]</sup>。针对上述局限性,未来研发应重视以下几方面:(1)关注脑卒中不同时期的康复需求,采用一体化设计思路,使下肢外骨骼机器人系统的驱动控制和操作能够与康复训练有机结合,针对性解决运动障碍和异常步态模式,提高康复训练效率。(2)打破柔性关节技术、运动意图识别技术、人工智能技术、新材料技术、能源供给技术等研发壁垒。(3)基于生机电一体化技术,提高人机系统的协同水平,增强步行的动态稳定性和安全性,针对不同路况调整辅助模式,实现人机兼容与人机和谐,满足脑卒中患者对外骨骼机器人智能化、美观化、舒适化的需求。(4)充分考虑人体运动机制和患者特征,重视感觉的早期正确输入,让患者在舒适状态下促进主动步行训练;同时,将生物反馈、功能性电刺激、虚拟现实技术等融合到下肢外骨骼机器人系统中,逐步解决步行训练中的异常运动模式。(5)降低研发成本、扩大生产规模,并将其纳入医保范围,切实提高下肢外骨骼机器人系统的市场应用率及辐射规模。

利益冲突 无

#### 参 考 文 献

- [1] Wang K, Zhu ZY, Zhu DS, Cao L, Guan YT. Clinical research

- progress of exoskeleton robot in patients with lower limb dyskinesia[J]. *Zhonghua Shen Jing Ke Za Zhi*, 2020, 53:454-459.[王侃, 朱泽宇, 朱德生, 曹立, 管阳太. 外骨骼机器人在下肢运动障碍患者中的临床研究进展[J]. *中华神经科杂志*, 2020, 53:454-459.]
- [2] Cheng X, Bai DQ, Peng XH. Application and research progress of lower limb exoskeleton rehabilitation robot in stroke rehabilitation[J]. *Zhongguo Kang Fu Yi Xue Za Zhi*, 2021, 36:1327-1332.[程雪, 白定群, 彭晓华. 下肢外骨骼康复机器人在脑卒中康复中的应用和研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36:1327-1332.]
- [3] Cheng H, Huang R, Qiu J, Wang YL, Zou ZB, Shi KC. A survey of rehabilitation robot and its clinical applications[J]. *Ji Qi Ren*, 2021, 43:606-619.[程洪, 黄瑞, 邱静, 王艺霖, 邹朝彬, 施柯丞. 康复机器人及其临床应用综述[J]. *机器人*, 2021, 43:606-619.]
- [4] Lee HY, Park JH, Kim TW. Comparisons between Locomat and Walkbot robotic gait training regarding balance and lower extremity function among non-ambulatory chronic acquired brain injury survivors[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100:e25125.
- [5] Wang J, Lu RR, Bai YL. Application of lower limb exoskeleton rehabilitation robot in stroke rehabilitation[J]. *Shanghai Dian Qi Ji Shu*, 2019, 12:7-13.[王静, 陆蓉蓉, 白玉龙. 下肢外骨骼康复机器人在脑卒中康复中的应用研究[J]. *上海电气技术*, 2019, 12:7-13.]
- [6] Hidayah R, Bishop L, Jin X, Chamrathy S, Stein J, Agrawal SK. Gait adaptation using a cable-driven active leg exoskeleton (C-ALEX) with post-stroke participants[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28:1984-1993.
- [7] Tamburella F, Lorusso M, Tramontano M, Fadlun S, Masciullo M, Scivoletto G. Overground robotic training effects on walking and secondary health conditions in individuals with spinal cord injury: systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19:27.
- [8] Maggio MG, Naro A, De Luca R, Latella D, Balletta T, Caccamo L, Pioggia G, Bruschetta D, Calabrò RS. Body representation in patients with severe spinal cord injury: a pilot study on the promising role of powered exoskeleton for gait training[J]. *J Pers Med*, 2022, 12:619.
- [9] Høyer E, Opheim A, Jørgensen V. Implementing the exoskeleton Ekso GT™ for gait rehabilitation in a stroke unit-feasibility, functional benefits and patient experiences[J]. *Disabil Rehabil Assist Technol*, 2022, 17:473-479.
- [10] Han JY, Wang YH, Wan DQ. Research progress and development trend of lower extremity exoskeleton rehabilitation robot[J]. *Shanghai Jiao Tong Da Xue Xue Bao (Yi Xue Ban)*, 2022, 42:241-246.[韩稷钰, 王衍鸿, 万大千. 下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J]. *上海交通大学学报(医学版)*, 2022, 42:241-246.]
- [11] Ma Y. Researches on human-exoskeleton coordinated control strategy of lower limb exoskeleton[D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2020.[马跃. 下肢外骨骼机器人人机协同控制策略研究[D]. 深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2020.]
- [12] Li LF, Zhu LY, Gou XF. Current status and development trend of wearable lower-limb exoskeleton rehabilitation robot[J]. *Yi Liao Wei Sheng Zhuang Bei*, 2019, 40:89-97.[李龙飞, 朱凌云, 苟向锋. 可穿戴下肢外骨骼康复机器人研究现状与发展趋势[J]. *医疗卫生装备*, 2019, 40:89-97.]
- [13] Sale P, Franceschini M, Waldner A, Hesse S. Use of the robot assisted gait therapy in rehabilitation of patients with stroke and spinal cord injury[J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2012, 48:111-121.
- [14] Chen C. Research on lower extremity rehabilitation exoskeleton[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.[陈冲. 下肢康复外骨骼机器人研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020.]
- [15] Taki S, Imura T, Iwamoto Y, Imada N, Tanaka R, Araki H, Araki O. Effects of exoskeletal lower limb robot training on the activities of daily living in stroke patients: retrospective pre-post comparison using propensity score matched analysis[J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2020, 29:105176.
- [16] Zheng QX, Ge L, Wang CC, Ma QS, Liao YT, Huang PP, Wang GD, Xie QL, Rask M. Robot-assisted therapy for balance function rehabilitation after stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Nurs Stud*, 2019, 95:7-18.
- [17] Gao Z, Pang Z, Chen Y, Lei G, Zhu S, Li G, Shen Y, Xu W. Restoring after central nervous system injuries: neural mechanisms and translational applications of motor recovery[J]. *Neurosci Bull*, 2022, 38:1569-1587.
- [18] Luo L, Li C, Du X, Shi Q, Huang Q, Xu X, Wang Q. Effect of aerobic exercise on BDNF/proBDNF expression in the ischemic hippocampus and depression recovery of rats after stroke[J]. *Behav Brain Res*, 2019, 362:323-331.
- [19] Ma YX. The effect of the Lokomat robot on the lower limbs function of ischemic stroke patients[D]. Tangshan: Hebei United University, 2014.[马亚新. Lokomat 机器人对缺血性脑卒中患者下肢功能的影响[D]. 唐山: 河北联合大学, 2014.]
- [20] Khalili M, Machiel Van der Loos HF, Borisoff JF. Studies on practical applications of safe-fall control strategies for lower limb exoskeletons[J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2019:536-541.
- [21] Tan CK, Kadone H, Watanabe H, Marushima A, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Lateral symmetry of synergies in lower limb muscles of acute post-stroke patients after robotic intervention[J]. *Front Neurosci*, 2018, 12:276.
- [22] He MQ, Wu CH, Li Y, Shen LF, Bao YZ. Effect of early hyperbaric oxygen combined with lower limb rehabilitation robot training on walking ability of stroke patients with hemiplegia[J]. *Zhongguo Kang Fu Yi Xue Za Zhi*, 2015, 30:395-397.[何敏琴, 吴彩虹, 李岩, 沈林芳, 包永珍. 早期高压氧联合下肢康复机器人训练对脑卒中偏瘫患者步行能力的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30:395-397.]
- [23] Louie DR, Mortenson WB, Durocher M, Schneeberg A, Teasell R, Yao J, Eng JJ. Efficacy of an exoskeleton-based physical therapy program for non-ambulatory patients during subacute stroke rehabilitation: a randomized controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18:149.
- [24] Longatelli V, Pedrocchi A, Guanziroli E, Molteni F, Gandolla M. Robotic exoskeleton gait training in stroke: an electromyography-based evaluation[J]. *Front Neurobot*, 2021, 15:733738.
- [25] Nilsson A, Vreede KS, Häglund V, Kawamoto H, Sankai Y, Borg J. Gait training early after stroke with a new exoskeleton: the hybrid assistive limb: a study of safety and feasibility[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11:92.
- [26] Bao Y, Duo Q, Zhang YR, Chen S, Yang YA, Yin Y. Effect of lower limb rehabilitation robot on walking function in patients convalescent with ischemic stroke[J]. *Zhongguo Kang Fu Yi Xue Za Zhi*, 2022, 37:1079-1083.[包译, 朵强, 张源芮, 陈石, 杨颜安, 尹勇. 下肢康复机器人对缺血性脑卒中恢复期患者步行功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37:1079-1083.]
- [27] Mizukami M, Yoshikawa K, Kawamoto H, Sano A, Koseki K, Asakwa Y, Iwamoto K, Nagata H, Tsurushima H, Nakai K, Marushima A, Sankai Y, Matsumura A. Gait training of subacute stroke patients using a hybrid assistive limb: a pilot



- study[J]. Disabil Rehabil Assist Technol, 2017, 12:197-204.
- [28] Infarinato F, Romano P, Goffredo M, Ottaviani M, Galafate D, Gison A, Petruccelli S, Pournajaf S, Franceschini M. Functional gait recovery after a combination of conventional therapy and overground robot-assisted gait training is not associated with significant changes in muscle activation pattern: an EMG preliminary study on subjects subacute post stroke [J]. Brain Sci, 2021, 11:448.
- [29] Dundar U, Toktas H, Solak O, Ulasli AM, Eroglu S. A comparative study of conventional physiotherapy versus robotic training combined with physiotherapy in patients with stroke [J]. Top Stroke Rehabil, 2014, 21:453-461.
- [30] Yeung LF, Ockenfeld C, Pang MK, Wai HW, Soo OY, Li SW, Tong KY. Randomized controlled trial of robot-assisted gait training with dorsiflexion assistance on chronic stroke patients wearing ankle-foot-orthosis [J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15: 51.
- [31] Calabrò RS, Naro A, Russo M, Bramanti P, Carioti L, Balletta T, Buda A, Manuli A, Filoni S, Bramanti A. Shaping neuroplasticity by using powered exoskeletons in patients with stroke: a randomized clinical trial [J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15:35.
- [32] Yang LL, Liu J, Cai HA. Application progress of lower limb rehabilitation robot in gait rehabilitation of stroke [J]. Shi Yong Yi Yuan Lin Chuang Za Zhi, 2022, 19:221-224. [杨玲玲, 刘津, 蔡华安. 下肢康复机器人在脑卒中步态康复中的应用进展 [J]. 实用医院临床杂志, 2022, 19:221-224.]
- [33] Xie HZ, Dong JG, Wang ZB, Li QY, Wu YQ, Liu YQ. Effect of lower limb exoskeleton walking robot on recovery of motor function and walking ability in stroke patients [J]. Zhongguo Lao Nian Bao Jian Yi Xue, 2020, 18:68-72. [谢红志, 董继革, 王战斌, 李巧英, 吴娱倩, 刘雨晴. 下肢外骨骼助行机器人对脑卒中患者运动功能和步行能力恢复的影响 [J]. 中国老年保健医学, 2020, 18:68-72.]
- [34] Wang ZB, Zhou LL, Wang CZ. Clinical application of lower limb exoskeleton rehabilitation robot in stroke patients [J]. Chifeng Xue Yuan Xue Bao (Zi Ran Ke Xue Ban), 2021, 37:50-53. [汪宗保, 周玲玲, 王从振. 下肢外骨骼康复机器人在脑卒中病人中的临床应用研究 [J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2021, 37:50-53.]

(收稿日期:2023-01-11)

(本文编辑:袁云)

## · 小词典 ·

## 中英文对照名词词汇(二)

美国国家心理健康研究所

National Institute Mental Health(NIMH)

美国国立神经病学、语言障碍和卒中研究所

National Institute of Neurological and Communicative Disorders and Stroke(NINCDS)

美国国立卫生研究院卒中量表

National Institutes of Health Stroke Scale(NIHSS)

美国精神医学学会 American Psychiatric Association(APA)

美国精神障碍诊断与统计手册第 5 版

Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders Fifth Edition(DSM-5)

美国神经精神病学协会

American Neuropsychiatric Association(ANPA)

美国心理学会 American Psychological Association(APA)

美国卒中协会 American Stroke Association(ASA)

10 米步行试验 10 Meter Walk Test(10MWT)

脑白质高信号 white matter hyperintensity(WMH)

脑干听觉诱发电位

brain stem auditory-evoked potential(BAEP)

脑机接口 brain-computer interface(BCI)

脑默认网络 default mode network(DMN)

脑深部电刺激术 deep brain stimulation(DBS)

脑微出血 cerebral microbleeds(CMBs)

脑小血管病 cerebral small vessel disease(CSVD)

脑血流量 cerebral blood flow(CBF)

脑卒中发病时间 time since stroke onset(TSS)

年龄和美国国立卫生研究院卒中量表 100

Stroke Prognostication Using Age and National Institutes of Health Stroke Scale(SPAN-100)

Berg 平衡量表 Berg Balance Scale(BBS)

起立-行走计时测验 Timed Up and Go Test(TUGT)

腔隙性梗死 lacunar infarct(LACI)

轻度认知损害 mild cognitive impairment(MCI)

曲线下面积 area under the curve(AUC)

全面无反应性量表

Full Outline of Unresponsiveness Scale(FOUR)

缺血性卒中预测风险评估

Ischemic Stroke Predictive Risk Score(IScore)

人工神经网络 artificial neural network(ANN)

人工智能 artificial intelligence(AI)

认知行为疗法 cognitive behavioral treatment(CBT)

软弹性复合执行器 soft-elastic composite actuator(SECA)

上肢动作研究测验 Action Research Arm Test(ARAT)

深度神经网络 deep neural network(DNN)

深度学习 deep learning(DL)

神经影像学血管性改变报告标准

Standards for Reporting Vascular changes on nEuroimaging (STRIVE)

失匹配负波 mismatch negativity(MMN)

事件相关电位 event-related potential(ERP)

事件相关去同步 event-related desynchronisation(ERD)

事件相关同步 event-related synchronization(ERS)

视觉诱发电位 visual-evoked potential(VEP)

随机森林 random forest(RF)

T<sub>2</sub>\*-梯度回波序列 T<sub>2</sub>\*-gradient echo sequence(T<sub>2</sub>\*-GRE)

体感诱发电位 somatosensory-evoked potential(SEP)