

· 综述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2023.15.024

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.r.20230425.1039.005.html\(2023-04-25\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.r.20230425.1039.005.html(2023-04-25))

柔性外骨骼机器人在下肢康复训练中的应用研究进展*

周政^{1,2}, 韩晓凤³综述, 张辛², 王健全^{2△}审校

(1. 天津体育学院, 天津 301617; 2. 北京大学第三医院运动医学科, 北京 100191;

3. 首都体育学院, 北京 100913)

[摘要] 机电技术与智能科技的崛起推动了外骨骼康复机器人研究领域的发展。由于疾病致残率上升和老年人口增加, 为患者提供康复和辅助服务的先进方案显得日益重要。研究证实, 使用下肢康复机器人可有效改善患者步态, 但临床应用的外骨骼种类有限。现有的康复机器人可分为两类: 以刚性连接驱动结构设计, 如 Lokomat、Rewalk、Ekso 和 HAL; 以柔性连接结构设计, 如 Myosuit 外骨骼机器人、XoSoft 和聚氯乙烯(PVC)-外骨骼等。柔性康复机器人作为近年来出现的一种新型外骨骼机器人, 能有效地解决传统刚性外骨骼机器人体积重量大、顺应性差、束缚多等问题, 已成为机器人主动康复领域的重要方向之一。作者总结了柔性外骨骼康复机器人在康复训练中的优势及局限性, 论述了下肢柔性外骨骼机器人近年在临床康复中的应用及其未来的应用前景, 为下肢柔性外骨骼机器人的医工交叉研究提供参考。

[关键词] 柔性外骨骼机器人; 步态训练; 医工结合; 康复机器人; 综述

[中图法分类号] TP24; R493

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2023)15-2368-06

Research progress on the application of flexible exoskeleton robots in lower limb rehabilitation training*

ZHOU Zheng^{1,2}, HAN Xiaofeng³, ZHANG Xin², WANG Jianquan^{2△}

(1. Tianjin Institute of Physical Education, Tianjin 301617, China; 2. Department of Sports

Medicine, Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China; 3. Capital Institute of

Physical Education, Beijing 100913, China)

[Abstract] The rise of electromechanical and intelligent technology has promoted the development of research on exoskeleton rehabilitation robots. Due to the increasing rates of disability and the growing geriatric population, there is a growing need for advanced rehabilitation and assistive services for patients. Studies have confirmed that the use of lower limb rehabilitation robots can effectively improve patients' gait. However, the availability of exoskeletons for clinical application is limited. Existing rehabilitation robots can be divided into two categories: structural designs driven by rigid connections, such as Lokomat, Rewalk, Ekso, and HAL. Designed with flexible connection structures, such as the Myosuit exoskeleton robot, XoSoft, and PVC-exoskeleton, flexible rehabilitation robots have emerged as a new type of exoskeleton robot in recent years. They effectively address the limitations of traditional rigid exoskeleton robots, such as their large volume, weight, poor compliance, and numerous constraints. As a result, flexible rehabilitation robots have become an important focus in the field of active rehabilitation of robots. The authors summarize the advantages and limitations of flexible exoskeleton rehabilitation robots in rehabilitation training. This paper discusses the recent application of lower limb flexible exoskeleton robots in clinical rehabilitation and explores their future prospects. It also serves as a reference for the medical-industrial cross-research of lower limb flexible exoskeleton robots.

[Key words] flexible exoskeleton robot; gait training; medical-industrial integration; rehabilitation robot; review

随着预期寿命的增加和慢性病的进一步流行, 全球残疾率呈上升趋势。根据世界卫生组织最新的数

据显示, 残疾人人数已从 2004 年的 7.85 亿增加到 2010 年的 10 亿, 其中约 1.1 亿人为严重残疾^[1]。联

* 基金项目: 北京市科技专项计划项目(Z22111000350000); 北京大学第三医院院队列建设项目(BYSYDL2021014)。 作者简介: 周政(1998-), 在读硕士研究生, 主要从事外骨骼机器人、智能支具、远程康复方向的研究。 △ 通信作者, E-mail: wjqsportsmed@163.com。

合的一份报告显示了世界人口老龄化情况:到 2050 年,60 岁以上的人口将达到 20 亿,占世界总人口的 21.8%^[2]。虽然老年人占残疾人口的大多数,但由于肌肉骨骼和神经系统疾病而导致残疾最多的人群却是青壮年(20~54 岁)^[3]。为应对日益增长的患者数量、医疗成本上升和设备技术短缺等各方面的挑战,医疗卫生系统必须足够先进灵活^[4]。医疗卫生系统中包含很多新兴技术,而外骨骼机器人就是其中较为典型的一种。外骨骼机器人或矫形器是一种机械设备,用于帮助功能障碍人群进行身体康复,增强人体的身体承载能力或协助老年人的日常生活等^[5-6]。迄今为止,外骨骼机器人研究的主要重点是医疗应用,如支持中风和脊髓损伤患者的行动和康复^[7]。在这些外骨骼机器人中,工程研究领域对协助步态移动的下肢外骨骼发展较为关注,因为其具有更广泛的应用。

下肢外骨骼机器人轻便易穿^[8-10],该领域的研究重点正转向轻质材料的开发,力求使外骨骼重量更小、更人性化,提高工作效率^[11]。近年来,有研究者提出采用柔性结构设计取代刚性结构设计,模拟人体肌肉工作原理来实现关节辅助^[12]。柔性外骨骼机器人作为一种新兴的外骨骼技术,对功能障碍患者的治疗作用受到了越来越多的关注。但是,现有的外骨骼综述大多都关注于硬件结构和本身系统设计,较少从临床康复应用的视角出发,尤其缺少关于柔性外骨骼系统在临床康复应用的相关研究。因此,本综述重点关注柔性外骨骼机器人在康复治疗中的应用,展望其未来发展方向,同时希望后续研究与临床研究紧密结合。

1 外骨骼机器人

外骨骼机器人实质上是一种穿戴式机器人,是穿戴在人体外部的机械结构,涉及电子、机械、智能技术和计算机等各个领域,同时融合了传感、控制、信息耦合和移动计算等各种高新技术的一种集成产品,在为穿戴者提供如保护、助力、身体支撑等功能的基础上,能对人体进行辅助或者主动助力,满足人体的各种运动需求^[13]。根据外骨骼机器人的结构组成不同,大致可分为刚性外骨骼机器人和柔性外骨骼机器人。

1.1 刚性外骨骼机器人

刚性外骨骼机器人其连接结构大多采用刚性机械结构设计,能够直接为人体提供支撑、助力、步行等功能,目前最具代表性的包括 Lokomat^[14-15]、ReWalk^[16-17]、Ekso^[18]和 HAL^[19-20]等。刚性外骨骼机器人的优势是能够精确且快速地实现位置控制,力传递效果好。然而刚性外骨骼的重量一般较大,会增加穿戴者的额外能量消耗,同时关节的自由活动度也会因为刚性结构而造成一定限制,从而改变穿戴者本身的自然步态模式^[21-22]。这些问题影响了刚性外骨骼的康复效果,限制了刚性外骨骼系统在临床康复中的实际应用。

1.2 柔性外骨骼机器人

柔性外骨骼机器人具有灵活的结构、驱动和运动模式,能为人体运动提供顺应的助力模式。设计时,研究人员需要考虑穿戴的柔顺性,同时要实现有效助力。相比刚性外骨骼,柔性外骨骼更加考虑柔顺性和安全性^[23]。目前应用较为广泛的包括 Myosuit 外骨骼机器人^[24-25]、XoSoft^[26-27]、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)-外骨骼^[28]和 ReWalk ReStoreTM^[29]等。柔性外骨骼机器人主要由 4 个部分组成。(1)柔顺外骨骼套:一般采用轻质、耐用的功能性纺织品,在实现较好柔韧性和灵活性的同时,在合适的位置加入弹性单元,使其更具柔顺性。(2)轻型驱动系统:采用轻型的主动驱动(如微型电机),可有效减轻穿戴者的负重并结合被动元件弹簧实现对人体助力运动。(3)运动感知系统:包括力传感器、角度传感器、陀螺仪等,可对穿戴者及柔性装置的运动进行检测。(4)智能控制系统:控制系统具有智能性,需要及时响应穿戴者的生理信息和运动信息^[24]。

2 柔性外骨骼机器人在康复训练中的应用

较多文献报道了柔性外骨骼机器人重要的研究意义,并进行了详细的分析和概述^[13,23,30],但是缺乏涉及柔性外骨骼机器人应用于临床康复的调查文章,这可能是由于柔性外骨骼机器人研究历史较短,且病例研究和人体研究具有困难性,导致临床适用性与实验室研究之间存在严重脱节。从临床来看,很难客观评估这些装置的设计、功能和控制是否能较好地应用于患者。因此,调查分析柔性外骨骼在临床中的应用现状,能为临床康复和外骨骼研究之间建立起更紧密的联系。

2.1 辅助髌、膝关节的柔性外骨骼机器人在康复训练中的应用

KAI 等^[31]于 2017 年发布柔性外骨骼机器人 Myosuit,用于髌关节和膝关节伸展的双关节辅助,旨在帮助大量患有不同程度肌肉无力的患者。其在 2019 年首次进行了临床实验,其中,1 例脊髓损伤的患者穿戴 MyoSUIT 进行训练后,10 m 步行计时测试的步行速度从 0.36 m/s 提高到 0.52 m/s,在 10%~30%的步态周期中髌关节和膝关节伸展均增加^[24]。其在同年招募了 12 例受试者进行了临床实验,最终 8 例受试者完成了实验,其中 5 例在使用 Myosuit 时的步行速度高于其原本的步行速度。在实验过程中,并没有发生任何不良事件,表明在康复训练过程中使用 Myosuit 安全可行,且不同运动障碍的个体均对 Myosuit 具有良好的耐受性^[32]。

XoSoft^[33]是由意大利 Dept Adv Robot 公司 2017 年针对由于部分丧失感觉或运动功能的行动不便患者研发的机器人。其控制策略是通过在步行周期的特定阶段增加髌关节、膝关节屈曲角度和提高摆动阶段离地间隙来改善步态模式。该公司在 2018 年^[34]和 2019 年^[26]对卒中后偏瘫患者进行了临床实

验,比较穿戴 XoSoft 与未穿戴患者的直线行走功能。结果表明,XoSoft 在直线行走过程中能量成本降低了 7.8%。其中,在步行周期的摆动阶段,患者膝关节最大屈曲角度提高、髌关节的最大伸展角度降低、摆动阶段的离地间隙提高,但是患者在摆动后期过分依赖于外骨骼补偿策略,并没有达到预期的效果。

2.2 辅助髌关节的柔性外骨骼机器人在康复训练中的应用

YI 等^[28]开发了一种增塑 PVC 凝胶和网状电极的收缩型人造肌肉,将其应用在一种轻便、便携式和可穿戴式外骨骼机器人上,并进行了初步实验,以帮助老年人的日常生活。通过对轻度偏瘫患者(住院 3 个月,病人在没有矫形器的情况下可以独自行走)的步行功能进行测试,结果表明穿戴 PVC-外骨骼可以增加步行速度和步长,并且在步态周期的 40%~60% 期间,股直肌、缝匠肌和腓绳肌的积分肌电出现不同程度地下降,说明 PVC-外骨骼可有效减轻行走过程中下肢肌肉的负担^[35]。

LEE 等^[36]于 2019 年使用新开发的可穿戴式髌关节辅助机器人“GEMS”对 28 名卒中偏瘫患者进行了初步临床实验。最终,26 名患者完成了实验,与对照组(12 例)相比,实验组(14 例)步速、步频和步长均得到了改善且患侧的肌肉力量得到了提升。实验组在训练结束后肢体对称性、平衡、心肺功能得到良好改善。结果提示使用“GEMS”进行运动训练可以促进卒中患者的康复进程,效果较佳,但局限性是没有观察长期训练疗效,未来需要增加更多的样本量。

前期实验结果表明,使用跨步管理辅助(stride management assist,SMA)进行步态训练可以提高肌肉工作效率^[37]、降低能量成本^[38],改善卒中患者步长和空间不对称性^[39]。JAYARAMAN 等^[40]应用日本东京本田公司研发 SMA 外骨骼对 50 名慢性卒中患者进行临床实验,结果表明使用 SMA 外骨骼可以改善患者的步行速度,加强步行耐力,提升肌肉兴奋性,从而改善步行能力。研究人员表示未来将会进一步研究脑损伤的大小和位置对 SMA 训练结果的影响。

2.3 辅助踝关节的柔性外骨骼机器人在康复训练中的应用

美国波士顿大学研究团队在 2015 年首次对 ReWalk ReStoreTM 外骨骼机器人进行了临床应用,初步证明其能追踪卒中患者步态,可以在患者步行特定阶段提供助力,提示该外骨骼机器人的实用可行性^[41]。其后,该团队进行了优化,使其重量减轻、易于穿脱,并且能够有效地为患侧脚踝提供机械辅助。2018 年,该团队对 3 例步态不同的卒中患者进行研究,结果表明 ReWalk ReStoreTM 外骨骼机器人可以在改善患者步行向前推进的对称性和摆动阶段离地间隙,最终降低步行的能量成本^[42]。研究团队还发现外骨骼可以与卒中患者的偏瘫肢体同步发挥作用,使偏瘫侧踝关节的摆动阶段背屈角度增加(5.33 ± 0.91)°,对偏瘫肢

体产生(11 ± 3)% 的向前推进力。这些改变能够减少(20 ± 4)% 向前推进时的肢体间不对称性,并在站立时身体重心不对称性降低了 39%,步行能量成本平均减少 10%^[43-44]。对卒中患者穿戴 ReWalk ReStoreTM 外骨骼机器人的步行速度、距离和能量消耗的变化进行评估,结果表明患者在 10 m 步行测试中步行速度中位数增加(0.14 ± 0.06)m/s,并在 6 min 步行测试中行走距离增加(32 ± 8)m,说明卒中患者通过 ReWalk ReStoreTM 提供的跖屈肌和背屈肌辅助实现了具有临床意义的速度和距离增加^[45-46]。2020 年,商业版 ReWalk ReStoreTM 已正式投入市场。在最近的临床研究中,研究人员对 44 例偏瘫患者进行了外骨骼步态辅助效果研究,共 36 例患者完成了 5 d 的训练且步行功能均得到了改善。表明在物理治疗师的指导下,偏瘫患者步态康复期间使用 ReWalk ReStoreTM 进行训练安全可靠,后者可在跑步机和地上行走时可对踝趾屈和背屈提供辅助。

此外,KWON 等^[47]针对卒中患者设计了一种柔性机器人踝足矫形器。其在 2019 年对 1 例 49 岁卒中患者进行临床实验,结果显示矫形器能够在临床和日常生活中为患者提供步态辅助,患者在行进过程中可改善步态推进和预防足下垂。IUPPARIELLO 等^[48]测试了基于弹性元素的防护服(称为 Regent Suit)对 60 名亚急性卒中患者运动和日常生活方面的疗效,研究结果表明,实验组步行速度、平衡功能和 barthel 指数都得到了良好的改善,说明使用 Regent Suit 在亚急性卒中患者的运动和日常生活方面的干预效果优于常规护理,患者在步行过程中可以使双侧肌肉对称性增加。SLOOT 等^[49]通过 8 名偏瘫患者测试了 Exosuit,研究比较了卒中患者在穿戴 Exosuit 下的地上行走情况。研究结果显示,Exosuit 辅助行走可以改善摆动期的向前推进和离地间隙。

柔性外骨骼在患者体验、舒适度等方面表现较好,但临床中的应用、样本数目较少,大多都限制在下肢功能障碍中,在康复过程中仍然存在一定的局限性。

3 柔性外骨骼机器人的优势及局限性

3.1 优势

(1)与传统的刚性外骨骼相比,柔性外骨骼机器人与人体充分贴合且易于适应不同人的不同步态特点;(2)在训练过程中,柔性外骨骼重量更轻,减少了因外骨骼重量过大而造成的代谢消耗,可以改善肢体间的不对称性;(3)在驱动方面,柔性外骨骼顺应性好,驱动柔顺,助力方式更符合人体生物力学,避免了穿戴外骨骼进行运动时而产生的疼痛与擦伤等问题;(4)在舒适度方面,柔性外骨骼机器人避免使用刚性元素,提供了更高的舒适度,便于穿脱;(5)在运动方面,柔性外骨骼机器人减少了刚性结构对关节的束缚,不会对佩戴者施加运动学限制,运动过程中造成的额外负荷小,其保持与人体动作协调的同时也能在

行走过程中对目标关节产生重要助力。

3.2 局限性

3.2.1 助力效果不佳

与刚性外骨骼机器人相比,柔性外骨骼机器人传力效率较低,运动功能辅助实际效率有限。柔性外骨骼机器人并不能完全实现替代患者的关节进行运动,对患者自身的功能水平也具有一定要求,控制精度相对较低。

3.2.2 人机交互不高

柔性外骨骼无法准确识别患者的运动意图,如果要实现患者的主动康复,需要针对某些特定任务评估患者的运动能力和运动表现,根据其运动能力和运动意图调整机器输出,控制各个关节的位置或速度,以确保柔性外骨骼机器人能够跟随患者的运动意图进行顺从的辅助运动,而不会对人体造成二次伤害(如擦伤)^[12]。

3.2.3 结构刚度较低

柔性外骨骼机器人不能独立支撑人体自身重量,需要患者下肢力量协助支撑身体重量。

3.2.4 智能程度不高

自主学习能力不强,智能化程度不高,柔性外骨骼机器人的控制系统相对落后,多种参数要人为进行测量和操作。

3.2.5 临床应用有限

从现有的研究文献中发现,目前,大部分柔性外骨骼机器人对健康受试者或者患者进行实验的样本量较少,受试群体不多且大多研究都针对步态障碍,需要更大样本量的临床测试来证明柔性外骨骼机器人的有效性。

4 发展侧重点

为了应对国内康复市场的巨大需求,柔性康复机器人作为一种新型的外骨骼机器人技术,现已成为研究者关注的重点内容。随着5G传感、智能科技、计算机控制等技术的不断发展,柔性外骨骼机器人的迭代十分迅速,有望成为步态障碍患者的一种有效助力工具。虽然我国在下肢康复外骨骼机器人领域已经取得了一些进展与突破,但是在柔性外骨骼机器人方面与国际上还存在着一定差距,在今后的发展中应侧重以下几点。

4.1 提高运动功能辅助效率

以柔性驱动的康复机器人辅助效果较低,离刚性驱动的康复机器人实际辅助功率水平还有一定差距。该领域的研究重点一直是如何通过优化穿戴结构、设计新式机械驱动、研发新型的柔性材料来提高驱动效能,同时建议寻找性价比更高的材料,实现康复机器人的普适性^[12]。

4.2 深入研究人机交互策略

目前,人工智能得到了深度发展。外骨骼机器人控制系统也应与时俱进,实现智能控制,使得操作简单容易,增强用户体验;同时,增加触觉反馈,增强人

体与机器人的交互^[45]。

4.3 结构模块化设计

柔性外骨骼机器人按照一定的规则进行模块划分,可以降低外骨骼的复杂性,从而使外骨骼机器人结构简单,性能稳定,方便使用与维修,可以更好地满足不同用户的实际需求^[50]。

4.4 增加临床实验

柔性外骨骼机器人大多数基于人体仿生学设计,能够顺利地完成人机协调运动,但是在目前的临床实验中,样本量大多较小,仅有少量的健康受试或者患者参与实验。因此,应增加临床实验的样本量来证实其有效性。

4.5 研究先进传感器

在训练过程中,柔性外骨骼机器人的助力效果、穿戴者疲劳程度、康复效果等都不能在训练时进行及时的监测与呈现,急需先进传感器来实时检测受试者的身体状态。

5 小 结

近年来,随着康复需求的扩大,康复机器人得到了极大的发展,但是较少有工程研究关注机器人在临床上的实际应用。作者重点关注了多款下肢柔性外骨骼机器人在康复领域的应用及其疗效,希望能为研究者带来思考,让实验室研究与临床研究紧密结合,避免出现两者严重脱节的现象。随着科学技术的不断发展,柔性下肢外骨骼康复机器人的功能也更加完善,康复医疗效果日渐提高,深入研究康复外骨骼机器人具有重要的科学意义和社会价值。

参考文献

- [1] LANCET T. World report on disability[J]. Lancet, 2011,377(9782):1-13.
- [2] ZIMMER Z. Global ageing in the twenty-first century: challenges, opportunities and implications [J]. Can Stud Popul,2016,42(3/4):99.
- [3] JAMES S L, ABATE D, ABATE K H, et al. Global, regional and national incidence, prevalence and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories,1990-2017:a systematic analysis for the global burden of disease study 2017[J]. Lancet, 2018,392(10159):1789-1858.
- [4] PROIETTI T,CROCHER V,ROBY-BRAMI A,et al. Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation:a review on control strategies[J]. IEEE Rev Biomed Eng,2016,9:4-14.
- [5] YOUNG A J,FERRIS D P. State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2016,25(2):171-182.

- [6] ALIMAN N, RAMLI R, HARIS S M. Design and development of lower limb exoskeletons: a survey[J]. *Rob Auton Syst*, 2017, 95:102-116.
- [7] BANGA H K, BELOKAR R M, KALRA P, et al. Fabrication and stress analysis of ankle foot orthosis with additive manufacturing[J]. *Rapid Prototyp J*, 2018, 24(2):301-312.
- [8] SHAHAR F S, SULTAN M T H, LEE S H, et al. A review on the orthotics and prosthetics and the potential of kenaf composites as alternative materials for ankle-foot orthosis[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019, 99:169-185.
- [9] 程洪, 黄瑞, 邱静, 等. 康复机器人及其临床应用综述[J]. *机器人*, 2021, 43(5):606-619.
- [10] JIAO C, LIU S, CHANG Y, et al. Wearable lower limb rehabilitation training robot[J]. *Int Core J Eng*, 2021, 7(7):407-412.
- [11] HUSSAIN F, GOECKE R, MOHAMMADIAN M. Exoskeleton robots for lower limb assistance: a review of materials, actuation, and manufacturing methods[J]. *J Eng Med*, 2021, 235(12):1375-1385.
- [12] 孟琳, 董洪涛, 侯捷, 等. 面向下肢康复的柔性外骨骼机器人进展研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(4):206-217.
- [13] 赵新刚, 谈晓伟, 张弼. 柔性下肢外骨骼机器人研究进展及关键技术分析[J]. *机器人*, 2020, 42(3):20.
- [14] NECKEL N, WISMAN W, HIDLER J. Limb alignment and kinematics inside a Lokomat robotic orthosis[J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2006, 2006:2698-2701.
- [15] CHERNI Y, HAJIZADEH M, BEGON M, et al. Muscle coordination during robotic assisted walking using Lokomat[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2019, 22(Suppl. 1):216-218.
- [16] ESQUENAZI A, TALATY M, PACKEL A, et al. The rewalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury affiliations: the rewalk powered exoskeleton[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2012, 91(11):911-921.
- [17] GE L, ZHU H, GREGG R D. On the design and control of highly backdrivable lower-limb exoskeletons: a discussion of past and ongoing work[J]. *IEEE Control Syst*, 2018, 38(6):88-113.
- [18] ANTONINO N, LORIS P, SALVATORE C R. Brain network organization following post-stroke neurorehabilitation[J]. *Int J Neural Syst*, 2022, 32(4):2250009.
- [19] YOKOTA C, YAMAMOTO Y, KAMADA M, et al. Acute stroke rehabilitation for gait training with cyborg type robot hybrid assistive limb: a pilot study[J]. *J Neurol Sci*, 2019, 404:11-15.
- [20] HIROYUKI F, TAKASHI M, TOSHIYASU O, et al. Tailor-made rehabilitation approach using multiple types of hybrid assistive limb robots for acute stroke patients: a pilot study[J]. *Assist Technol*, 2016, 28(1):53-56.
- [21] KWON S H, LEE B S, LEE H J, et al. Energy efficiency and patient satisfaction of gait with knee-ankle-foot orthosis and robot (ReWalk)-assisted gait in patients with spinal cord injury[J]. *Ann Rehabil Med*, 2020, 44(2):131-141.
- [22] JAHN G K. Influence of foot position on static and dynamic standing balance in healthy young adults[J]. *Hear Balance Commun*, 2018, 16(4):1-7.
- [23] 周伟杰, 韩亚丽, 朱松青, 等. 柔性外骨骼助力机器人发展现状综述[J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2019, 17(1):31-38.
- [24] HAUFE F L, KOBER A M, SCHMIDT K, et al. User-driven walking assistance: first experimental results using the Myosuit[J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2019, 2019:944-949.
- [25] SCHMIDT K, DUARTE J E, GRIMMER M, et al. The myosuit: biarticular anti-gravity exosuit that reduces hip extensor activity in sitting transfers[J]. *Front Neurobot*, 2017, 11:57.
- [26] DI NATALI C, POLIERO T, SPOSITO M, et al. Design and evaluation of a soft assistive lower limb exoskeleton[J]. *Robotica*, 2019, 37(12):2014-2034.
- [27] ORTIZ J, NATALI C D, CALDWELL D G. Soft robotics in rehabilitation[M]. San Diego: Academic Press, 2021:165-198.
- [28] YI L, HASHIMOTO M. Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators[J]. *Sens Actuator A Phys*, 2016, 239:26-44.
- [29] AWAD L N, ESQUENAZI A, FRANCISCO G E, et al. The ReWalk ReStore™ soft robotic exosuit: a multi-site clinical trial of the safety, reliability, and feasibility of exosuit-augmented post-stroke gait rehabilitation[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1):1-11.

- [30] MENG Q, ZENG Q, XIE Q, et al. Flexible lower limb exoskeleton systems: a review[J]. *Neuro-Rehabilitation*, 2022, 50(4): 367-390.
- [31] KAI S, DUARTE J E, MARTIN G, et al. The myosuit: bi-articular anti-gravity exosuit that reduces hip extensor activity in sitting transfers [J]. *Front Neurobot*, 2017, 11: 57.
- [32] HAUFE F L, SCHMIDT K, DUARTE J E, et al. Activity-based training with the Myosuit: a safety and feasibility study across diverse gait disorders[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 135.
- [33] ORTIZ J, ROCON E, POWER V, et al. Xosoft-a vision for a soft modular lower limb exoskeleton[M]. Berlin: Springer, 2017: 83-88.
- [34] ORTIZ J, POLIERO T, CAIROLI G, et al. Energy efficiency analysis and design optimization of an actuation system in a soft modular lower limb exoskeleton[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2017, 3(1): 484-491.
- [35] LI Y, HASHIMOTO M. PVC gel soft actuator-based wearable assist wear for hip joint support during walking[J]. *Smart Mater Struct*, 2017, 26(12): 125003.
- [36] LEE H, LEE S, SEO K, et al. Training for walking efficiency with a wearable hip-assist robot in patients with stroke: a pilot randomized controlled trial [J]. *Stroke*, 2019, 50(12): 3545-3552.
- [37] NAOJIRO T, SHINRO M, YASUSHI S, et al. Effect of stride management assist gait training for poststroke hemiplegia: a single center, open-label, randomized controlled trial [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2019, 28(2): 477-486.
- [38] LM S G, AI H G, POLO-DESANTOS M, et al. VP92 portable robotic exoskeleton stride management assist (SMA) [J]. *Int J Technol Assess*, 2019, 35(Suppl. 1): 95.
- [39] WATANABE A, KAWAI K, SATO K, et al. Gait changes brought about by continued use of Honda's stride management assist in patients with stroke-related hemiplegia [J]. *Phys Ther Japan*, 2016, 43(4): 337-341.
- [40] JAYARAMAN A, O'BRIEN M K, MADHAVAN S, et al. Stride management assist exoskeleton vs functional gait training in stroke [J]. *Neurology*, 2019, 92(3): 263-273.
- [41] BAE J, ROSSI S M M, O'DONNELL K, et al. A soft exosuit for patients with stroke: Feasibility study with a mobile off-board actuation unit [EB/OL]. (2015-09-28) [2022-08-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7281188>.
- [42] BAE J, SIVIY C, ROULEAU M, et al. A lightweight and efficient portable soft exosuit for paretic ankle assistance in walking after stroke [EB/OL]. (2018-09-13) [2022-08-11]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8461046>.
- [43] AWAD L N, BAE J, O DONNELL K, et al. A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke [J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9(400): eaai9084.
- [44] BAE J, AWAD L N, LONG A, et al. Biomechanical mechanisms underlying exosuit-induced improvements in walking economy after stroke [J]. *J Exp Biol*, 2018, 221(5): b168815.
- [45] AWAD L N, KUDZIA P, REVI D A, et al. Walking faster and farther with a soft robotic exosuit: implications for post-stroke gait assistance and rehabilitation [J]. *IEEE J Transl Eng Health Med*, 2020, 1: 108-115.
- [46] PORCIUNCULA F, BAKER T C, ARUMUKHOM REVI D, et al. Targeting paretic propulsion and walking speed with a soft robotic exosuit: a consideration-of-concept trial [J]. *Front Neurobot*, 2021, 15: 689577.
- [47] KWON J, PARK J, KU S, et al. A soft wearable robotic ankle-foot-orthosis for post-stroke patients [J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4(3): 2547-2552.
- [48] IUPPARIELLO L, D'ADDIO G, ROMANO M, et al. Efficacy of the regent suit-based rehabilitation on gait EMG patterns in hemiparetic subjects: a pilot study [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2018, 54(5): 705-716.
- [49] SLOOT L, BAE J, BAKER L, et al. A soft robotic exosuit assisting the paretic ankle in patients post-stroke: effect on muscle activation during overground walking [J]. *Gait Posture*, 2022, 95: 217-218.
- [50] 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(2): 241.

(收稿日期: 2022-09-15 修回日期: 2022-12-09)

(编辑: 张芃捷)