

· 综述 ·

康复机器人在下肢功能障碍康复中的应用<sup>△</sup>洪理徽<sup>1,3</sup>, 李洪叶<sup>1,2</sup>, 吕南宁<sup>1,2</sup>, 刘明明<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 连云港市第二人民医院, 江苏连云港 222000; 2. 西宁市第一人民医院, 青海西宁 810000; 3. 江苏大学连云港临床学院, 江苏连云港 222000)

**摘要:** 目前下肢功能障碍的患者日益增加, 下肢康复机器人的技术也在不断进步。下肢功能障碍严重影响患者的生活质量, 而下肢康复机器人的合理运用, 能够有效改善患者症状, 做到精准康复, 使康复策略更加优化。本文分别就不同下肢机器人的关键技术、装备特点, 结合国内外研究现状进行阐述; 对下肢机器人应用于不同关节和疾病的临床效果进行了分析; 最后, 对下肢康复机器人今后的发展进行了总结与展望。

**关键词:** 下肢功能障碍, 康复机器人, 脊髓损伤

**中图分类号:** R687

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-8478 (2024) 16-1492-06

**Application of rehabilitation robot in rehabilitation of lower limb dysfunction // HONG Li-hui<sup>1,3</sup>, LI Hong-ye<sup>1,2</sup>, LV Nan-ning<sup>1,2</sup>, LIU Ming-ming<sup>1,2,3</sup>. 1. The Second People's Hospital of Lianyungang City, Lianyungang 222000, China; 2. The First People's Hospital of Xining City, Xining 810000, China; 3. Lianyungang Clinical College, Jiangsu University, Lianyungang 222000, China**

**Abstract:** At present, the number of patients with lower limb dysfunction is increasing, while the technology of lower limb rehabilitation robot is also improving. Lower limb dysfunction seriously affects the quality of life of patients, however, the rational use of lower limb rehabilitation robots can effectively improve the symptoms of patients, achieve accurate rehabilitation, and make rehabilitation strategies more optimized. In this paper, the key technology and equipment characteristics of different lower limb robots are described, combined with the research status at home and abroad. The clinical effect of lower limb robot was analyzed in different joints and diseases. Finally, the future development of lower limb rehabilitation robot is summarized and prospected.

**Key words:** lower limb dysfunction, rehabilitation robot, spinal cord injury

下肢功能障碍是由于脊髓损伤、脑损伤等各种原因引起的肢体原有正常功能的减弱或丧失。近年来, 康复机器人技术在不断发展。下肢康复机器人在帮助下肢功能障碍患者恢复运动功能方面具有巨大潜力<sup>[1]</sup>。有研究表明, 下肢功能障碍患者可以通过重复运动激活神经通路, 患者可以通过康复机器人机械装置辅助肢体运动, 进行康复训练, 显著提高康复效果, 改善生活质量<sup>[2]</sup>。本文就康复机器人在下肢功能障碍患者康复过程中的应用进行阐述。

## 1 下肢康复机器人简介

下肢康复机器人是在减重等速平板训练基础上进一步发展而来的智能化训练系统, 是近年来国内外康

复领域行走训练的手段, 可以为患者提供高强度、持续、集中、反复、任务导向性的模拟正常生理步态的训练<sup>[3, 4]</sup>。下肢康复机器人主要由人体运动数据采集系统、体重支持系统、为患者提供辅助力量以及驱动机器人运动的驱动系统3个部分组成<sup>[5]</sup>。根据当前康复过程中的训练方式, 将康复机器人分为主要应用在康复中、后期的主动训练模式和主要应用于患者康复初期的被动训练模式两种类型<sup>[6]</sup>。在主动训练模式情况下, 机器人以患者的运动意识为主导, 由下肢康复机器人提供辅助力, 帮助患者完成复杂的步态训练。主动训练的前提是准确估计患者的运动意图, 并以患者的主动力矩作为运动意图的表征<sup>[7]</sup>。主动康复训练最重要的部分是患者下肢运动意图的获得<sup>[8]</sup>。被动训练模式则主要是在患者下肢无主动力或下肢主动力不

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.100495

**△基金项目:** 江苏省重点研发计划(社会发展面上项目)(编号:BE2021679); 青海省重点研发与转化计划(科技援青专项项目)(编号:2022-QY-208); 国家残联课题(残疾人辅助器具专项)(编号:2021CDPFAT-26)

**作者简介:** 洪理徽, 在读硕士研究生, 研究方向: 脊柱外科, (电子信箱)honglihui1208@163.com

**\*通信作者:** 刘明明, (电子信箱)drliumingming@163.com

足时, 完全或半完全由机器人提供主导运动和力输出, 从而带动下肢进行康复训练, 同时由康复医师在旁协助, 该模式通常用于增加受损下肢的运动范围<sup>[9]</sup>。有研究表明, 目前研究下肢运动控制和康复的机器人侧重于步态训练, 下肢康复的方法几乎完全集中在循环任务上, 尤其是步态和步态样任务<sup>[8]</sup>。另一种方法是专注于恢复前驱能力, 例如运动适应和意志运动, 这在上肢机器人治疗中很常见<sup>[10]</sup>。现如今对康复机器人控制策略的研究已经逐渐从提供固定的、相对僵硬的辅助治疗转向具有强制性的替代方案, 辅助或挑战策略可以最大限度地提高受试者的参与度<sup>[11]</sup>。

## 2 国内外的技术研究现状

下肢康复机器人涉及电子计算机技术、传感技术、机械工程、机械电子、生物信息、康复医学、生物医学等多个学科领域<sup>[12]</sup>。康复机器人的运动轨迹、用力大小等参量对下肢功能障碍患者的康复具有重要的影响, 而且不同的下肢功能障碍患者对机器人轨迹、用力大小、频率等的要求不同。近十年来, 下肢康复机器人技术在动作预测与控制方法、功能、驱动等关键技术方面有了较大的发展。

### 2.1 动作预测与控制方法

2013 年 Aminiazar<sup>[13]</sup> 基于神经网络和遗传算法的二自由度下肢康复机器人优化智能控制方法, 研究出了采用混合控制和自适应控制相结合的方法进行控制操作臂的机器人。Liang 等<sup>[7]</sup> 为了实现主动训练, 综合考虑关节耦合系数和粘度的影响, 采用双闭环控制结构, 提出了一种基于位置的阻抗控制方法。2020 年, Shi 等<sup>[14]</sup> 利用三阶 Taylor 型数值微分公式对模型预测控制 (model predictive control, MPC) 的约束条件进行线性化和离散化, 将其推广到下肢康复机器人, 并提出了一种新的求解 MPC 的数值方法和投影主动集共轭梯度法, 实现了下肢康复机器人人机交互控制和主动康复训练的意图识别。Yang<sup>[11]</sup> 提出了一种通过放大或减少用户与康复机器人之间的偏差, 根据用户的表现在辅助模式和挑战模式之间动态切换的控制策略, 一个为了实现机器人与患者之间的无缝识别和身体互动的多传感器融合系统, 以在康复训练过程中提供准确的活动和运动能力识别、跌倒检测和身体健康评估, 以及一种控制移动下肢康复训练机器人的自适应径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经滑动模式控制器。Tsai 等<sup>[12]</sup> 在 2022 年为了发展气

动人工肌肉 (pneumatic artificial muscle, PAM) 在二自由度下肢康复辅助训练机器人系统中的应用, 提出了利用单个 PAM 和扭转弹簧驱动关节实现双轴机器人设计的新概念和基于自适应自组织模糊滑动模式控制器的关节控制器, 开发了一种带扭转弹簧的单 PAM 驱动二自由度下肢康复辅助训练机器人系统, 实现了关节角度定位和步态规划控制所需的控制性能。Peng<sup>[1]</sup> 为下肢康复机器人设计了具有线性主动抗扰控制的控制器, 包括稳态控制、前馈控制和反馈控制。

### 2.2 机器人的功能

2015 年, 韩国推出的 Morning Walk 作为为步态障碍患者开发的新型末端效应器型下肢康复机器人, 可提供多种训练模式, 包括地面行走和上下楼梯<sup>[15]</sup>。Feng 等<sup>[16]</sup> 在 2016 年提出了一种新型实用有效的坐/卧式下肢康复机器人, 该机器人具有机械极限保护、电极保护保护和软件保护 3 种功能, 可防止患者的二次损伤。2021 年, Li 等<sup>[17]</sup> 的一项研究观察了脑机接口操作的下肢康复机器人对脑卒中功能恢复的影响, 该机器人基于康复医学理论和人机合作原理, 融入了稳态运动结合镜像神经元理论和虚拟现实技术, 并通过模拟正常人站立时的步伐, 利用人体自然站立的反重力和平衡系统, 为患者提供辅助训练和行走装置, 从而可以有序地调节步态和协调姿势。此外, 美国犹他大学的学者提出了辅助用户的残肢与动力髌关节外骨骼系统, 该系统能够通过增加髌关节的动力来降低行走的代谢成本, 对下肢功能障碍患者的活动能力产生相当大的积极影响, 明显改善患者的生活质量<sup>[18, 19]</sup>。

### 2.3 机器人的驱动

近年来, 下肢康复机器人的驱动方式不断得到更新, 不同的学者提出了不同驱动模式的下肢康复机器人, 例如无动力型、气动型、仿生肌肉电缆型和纳米发电机型等, 其中电缆配置是下肢康复外骨骼的一个很有前途的设计选择<sup>[20]</sup>。来自韩国的学者设计了一种无驱动和无电源的被动关节式无动力外骨骼, 该机器人能够灵活改变载荷, 亦可以根据佩戴者的工作环境灵活地更换; 由于没有额外的驱动器和电源, 它具有很高的安全性和经济性<sup>[21]</sup>。Goergen 等<sup>[22]</sup> 提出了一种新的气动机器人下肢康复模块化解决方案的开发和数学建模, 为机器人机构推导出的非线性数学关系确定制动器的适当位置, 以获得所需的功能运动, 以便下肢康复。Wang 等<sup>[23]</sup> 提出了一种仿生肌肉电缆来构建一种仿生肌肉电缆驱动的下肢康复机器人。

Prasad 等<sup>[20]</sup>对电缆驱动机器人的设计配置进行了优化,提出了一种基于仿真的通用框架,该框架可用于研究不同的电缆配置,识别合适的电缆配置及其相关的最优参数。Zhang 等<sup>[24]</sup>利用摩擦纳米发电机在可穿戴电子产品和物联网中展现出的优点,提出了基于摩擦纳米发电机的可穿戴设备,用于步态分析和腰部运动捕捉,以提高下肢和腰部康复的智能和性能。

### 3 下肢康复机器人的临床应用

近年来有大量临床研究验证了下肢康复机器人的康复治疗效果。下肢康复机器人对于髋关节、膝关节、踝关节等下肢关节的功能恢复都有不错的效果,同时下肢康复机器人可以广泛适用于包括脊髓损伤、脑损伤等各种原因引起的下肢功能障碍。

#### 3.1 髋关节疾患

下肢康复机器人对髋关节角度和运动功能等的恢复有一定的帮助。Kawasaki<sup>[25]</sup>采用假对照交叉随机试验对 10 例痉挛性脑瘫儿童进行研究,通过本田步行辅助器辅助双髋运动,发现患肢的髋屈曲和伸展最大角度得到改善,受影响肢体的对称性也得到改善。有学者通过对 34 例髋部骨折老年患者进行随机对照试验,其中对照组 24 例采用常规治疗,实验组 10 例采用 SWalker 康复,结果发现实验组所需要的康复次数较常规治疗组少,但下床活动时间早于常规治疗组,因此认为 SWalker 可以成为提高老年髋部骨折患者自主步态和缩短康复治疗的有效工具<sup>[26]</sup>。

#### 3.2 膝关节疾患

膝关节的主要功能是负重和屈伸,当膝关节功能障碍时,会引起肌肉萎缩、关节粘连甚至关节僵硬,患者的日常活动就会极大地受限,下肢机器人可以帮助恢复膝关节的正常功能,缩短康复时间,维持正常的日常活动,并减少对膝关节的损伤<sup>[27-29]</sup>。Cai<sup>[30]</sup>将 88 例接受全膝关节置换术的患者随机分配到对照组或实验组,其中对照组患者采用传统手法进行康复治疗,而实验组患者采用机器人辅助康复方案,结果显示实验组在主动活动度、被动活动度和改良 Barthel 指数评分方面的改善效果明显优于对照组,从而证明了机器人辅助康复训练是一种有效的干预措施,可显著改善全膝关节置换术后老年人的日常活动能力和膝关节功能。

#### 3.3 踝关节疾患

踝关节在下肢康复机器人的辅助下可以改善步态、提升活动能力、恢复功能<sup>[31]</sup>。2011 年, Wu

等<sup>[32]</sup>将 12 例患有轻度至中度痉挛性踝关节损伤与脑瘫的儿童进行持续 6 周机器人康复,主动训练与参与被动运动训练相结合,对于踝关节损伤与脑瘫的儿童是有益的,展示了关节生物力学特性、运动控制性能以及平衡和活动能力方面的提升。有学者在一项双盲随机对照试验中,让 20 例脚踝运动障碍的慢性中风患者参加了为期约 30 周的机器人辅助步态训练,结果显示,主动踝关节辅助诱导步态模式发生变化,步态独立性得到改善,运动功能得到恢复,步行速度有了提升<sup>[31]</sup>。

#### 3.4 脊髓损伤

脊髓损伤的患者不仅会面临下肢功能障碍的问题,而且可能会面对其他系统的并发症<sup>[32]</sup>。使用康复机器人对脊髓损伤患者进行康复治疗,可以使患者尽早恢复下肢功能,还能够减少长期卧床等原因引起的并发症<sup>[34, 35]</sup>。脊髓损伤康复的主要策略是改善运动功能的疗法<sup>[36-38]</sup>。有临床随机对照研究中纳入了 88 例患者,并随机分为两组,第 1 组接受了机器人康复治疗 and 常规治疗,第 2 组接受常规治疗,使用脊髓损伤步行指数和功能独立性测量评分评估患者的功能恢复水平,结果发现,在短期内,机器人组的恢复效果明显优于对照组<sup>[39]</sup>。另有单盲随机对照临床试验中,将 18 例脊髓损伤患者随机分为外骨骼辅助步行组和常规治疗组,结果表明,与传统训练相比,外骨骼辅助步行组具有促进胸部神经水平较低的脊髓损伤个体肺功能恢复的潜在益处,同时外骨骼机器人仍有助于行走功能的恢复<sup>[40]</sup>。

#### 3.5 脑损伤

下肢康复机器人对脑损伤患者下肢功能的恢复主要体现在对下肢肌力、行走能力、平衡能力等方面的提升<sup>[41]</sup>。刘畅等<sup>[4]</sup>进行了一项临床随机对照研究,结果显示,脑卒中患者经过机器人辅助步行训练后,屈髋肌群肌力及步行能力等均明显提高,患者的下肢运动能力显著提高。卢建亮等<sup>[3]</sup>的一项随机对照研究也证明了下肢康复机器人比常规康复训练方法可以更加有效地提高下肢肌力。2019 年, Kim<sup>[15]</sup>为了探究 Morning Walk 辅助步态训练对脑卒中患者的影响,将 58 例首次中风后偏瘫的患者随机分到干预组和对照组,其中干预组使用下肢康复机器人 Morning Walk 和常规理疗进行康复训练,对照组只进行常规理疗,结果表明,与对照组相比,接受 Morning Walk 辅助训练的患者在患肢的运动能力和平衡能力方面有更大的改善。



#### 4 小结与展望

康复机器人通过现代信息技术、人工智能等技术的支持,通过对下肢功能障碍患者进行相应的康复锻炼,提高患者的下肢功能。下肢康复机器人的应用对脊髓损伤、脑卒中等各种原因引起的下肢功能障碍都能够起到促进康复的作用,提高患者下肢的运动能力,促进下肢肌力、平衡能力以及关节活动的改善,减少并发症的发生,提高了患者的生活质量。通过与常规的康复治疗相结合,对改善患者的稳定性等也有积极作用。目前,国内外对于人机交互、不同自由度的康复机器人的研究都取得了较大的进步,也提出了新的下肢康复机器人康复力的预测和控制方法,下肢康复机器人的训练模式在不断地更新,其驱动模式也得到了进步。感官系统在用户识别、运动监测以及机器人和游戏辅助训练方面表现良好,其在基于物联网的智能医疗应用中具有潜力<sup>[24]</sup>。

下肢康复机器人的确为患者下肢功能的康复起到了积极的作用,但是,其价格仍然比较昂贵、研发成本较高,同一台康复机器人不能适配不同体型的患者,不同类型康复机器人的康复效果还需要通过进行更多的临床试验来验证,同时还应该提高患者使用康复机器人时的舒适性等<sup>[42]</sup>,而且安全性是康复医疗器械的重要评价指标,是实际应用的重要前提<sup>[23]</sup>。下肢功能障碍中,每个人的功能障碍程度不同、病因不一样,年龄分布更是广泛,为了取得良好的康复效果,就要通过下肢康复机器人实现对下肢功能障碍患者的精准康复训练,针对每个人的特点做出个体化精准训练方案。未来的下肢康复机器人会更加安全、更加智能、更加高效、更加方便。机器人技术的持续进步和发展,会极大促进未来临床医学和康复医学的进步,同时,临床医学和康复医学的进步也会是推动康复机器人技术进步的重要环节。

#### 参考文献

[1] Peng H, Zhou J, Song R. A triple-step controller with linear active disturbance rejection control for a lower limb rehabilitation robot [J]. *Front Neurobot*, 2022, 16: 1053360. DOI: 10.3389/fnbot.2022.1053360.

[2] Tan C, Sun F, Fang B, et al. Autoencoder-based transfer learning in brain-computer interface for rehabilitation robot [J]. *Int J Adv Robot Syst*, 2019, 16 (2): 1-12. DOI: 10.1177/1729881419840860.

[3] Lu JL, Chen ZM, Wu H, et al. Rehabilitation effect of lower limb

rehabilitation robot training on lower limb motor function of stroke patients with hemiplegia [J]. *Chin J Mod Neurol Dis*, 2017, 17 (5): 334-339. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6731.2017.05.004.

[4] Liu C, Qie SY, Wang HM, et al. Effect of lower limb rehabilitation robot on lower limb motor function and walking ability of stroke patients with hemiplegia [J]. *Chin Rehabil Theory Pract*, 2017, 23 (6): 696-700. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2017.06.016.

[5] Shi NQ, Liu GF, Zheng TJ, et al. Research progress and clinical application of lower limb rehabilitation robot [J]. *Inform Control*, 2021, 50 (1): 43-53. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2021.0233.

[6] Du Y, Wang H, Qiu S, et al. An advanced adaptive control of lower limb rehabilitation robot [J]. *Front Robot AI*, 2018, 5: 116. DOI: 10.3389/frobt.2018.00116.

[7] Liang X, Wang W, Hou ZG, et al. Position based impedance control strategy for a lower limb rehabilitation robot [J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2019, 2019: 437-441. DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857186.

[8] Hu J, Meng Q, Zhu Y, et al. Spring damping based control for a novel lower limb rehabilitation robot with active flexible training planning [J]. *Technol Health Care*, 2023, 31 (2): 565-578. DOI: 10.3233/THC-220163.

[9] Wang Y, Liu Z, Feng Z. Design of a control framework for lower limb exoskeleton rehabilitation robot based on predictive assessment [J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2022, 95: 105660. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105660.

[10] Dawson-Elli AR, Adamczyk PG. Design and validation of a lower-limb haptic rehabilitation robot [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28 (7): 1584-1594. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.3000735.

[11] Yang T, Gao X. Adaptive neural sliding-mode controller for alternative control strategies in lower Limb Rehabilitation [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2020, 28 (1): 238-247. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2946407.

[12] Tsai TC, Chiang MH. A lower limb rehabilitation assistance training robot system driven by an Innovative pneumatic artificial muscle system [J]. *Soft Robot*, 2023, 10 (1): 1-16. DOI: 10.1089/soro.2020.0216.

[13] Aminiazar W, Najafi F, Nekoui MA. Optimized intelligent control of a 2-degree of freedom robot for rehabilitation of lower limbs using neural network and genetic algorithm [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2013, 10: 96. DOI: 10.1186/1743-0003-10-96.

[14] Shi T, Tian Y, Sun Z, et al. A new projected active set conjugate gradient approach for Taylor-type model predictive control: application to lower limb rehabilitation robots with passive and active rehabilitation [J]. *Front Neurobot*, 2020, 14: 559048. DOI: 10.3389/fnbot.2020.559048.

[15] Kim J, Kim DY, Chun MH, et al. Effects of robot-(Morning Walk<sup>®</sup>) assisted gait training for patients after stroke: a randomized controlled trial [J]. *Clin Rehabil*, 2019, 33 (3): 516-523. DOI: 10.1177/0269215518806563.

[16] Feng Y, Wang H, Yan H, et al. Research on safety and compliance

- of a new lower limb rehabilitation robot [J]. *J Healthc Eng*, 2017, 2017: 1–11. DOI: 10.1155/2017/1523068.
- [17] Li C, Wei J, Huang X, et al. Effects of a brain-computer interface-operated lower limb rehabilitation robot on motor function recovery in patients with stroke [J]. *J Healthc Eng*, 2021, 2021: 4710044. DOI: 10.1155/2021/4710044.
- [18] Ishmael MK, Archangeli D, Lenzi T. Powered hip exoskeleton improves walking economy in individuals with above-knee amputation [J]. *Nat Med*, 2021, 27 (10): 1783–1788. DOI: 10.1038/s41591-021-01515-2.
- [19] Ishmael MK, Gunnell A, Pruyk K, et al. Powered hip exoskeleton reduces residual hip effort without affecting kinematics and balance in individuals with above-knee amputations during walking [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2023, 70 (4): 1162–1171. DOI: 10.1109/TBME.2022.3211842.
- [20] Prasad R, El-Rich M, Awad MI, et al. A framework for determining the performance and requirements of cable-driven mobile lower limb rehabilitation exoskeletons [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2022, 10: 920462. DOI: 10.3389/fbioe.2022.920462.
- [21] Yun J, Kang O, Joe HM. Design of a payload adjustment device for an unpowered lower-limb exoskeleton [J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21 (12): 4037. DOI: 10.3390/s21124037.
- [22] Goergen R, Valdiero AC, Rasia LA, et al. Development of a pneumatic exoskeleton robot for lower limb rehabilitation [J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2019, 2019: 187–192. DOI: 10.1109/ICORR.2019.8779522.
- [23] Wang YL, Wang KY, Wang KC, et al. Safety evaluation and experimental study of a new bionic muscle cable-driven lower limb rehabilitation robot [J]. *Sensors (Basel)*, 2020, 20 (24): 7020. DOI: 10.3390/s20247020.
- [24] Zhang Q, Jin T, Cai J, et al. Wearable triboelectric sensors enabled gait analysis and waist motion capture for IoT-based smart healthcare applications [J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2022, 9 (4): e2103694. DOI: 10.1002/advs.202103694.
- [25] Kawasaki S, Ohata K, Yoshida T, et al. Gait improvements by assisting hip movements with the robot in children with cerebral palsy: a pilot randomized controlled trial [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17 (1): 87. DOI: 10.1186/s12984-020-00712-3.
- [26] Costa V, Ramirez O, Perea L, et al. Development and clinical validation of a rehabilitation platform for hip fracture in elderly population [J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2022, 30: 1340–1349. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3175688.
- [27] Soma Y, Mutsuzaki H, Yoshioka T, et al. Single-joint hybrid assistive limb in knee rehabilitation after ACL reconstruction: an open-label feasibility and safety trial [J]. *Prog Rehabil Med*, 2022, 7: 20220036. DOI: 10.2490/prm.20220036.
- [28] Chai RB, Liu R, Chen R. Early results of accelerated rehabilitation with total knee replacement [J]. *Chin J Orthop Surg*, 2021, 29 (10): 895–900. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.10.07.
- [29] Wang HQ, Huang JQ. Proprioceptive rehabilitation training for postoperative knee stiffness [J]. *Chin J Orthop Surg*, 2021, 29 (2): 174–176. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.02.19.
- [30] Cai L, Liu Y, Wei Z, et al. Robot-assisted rehabilitation training improves knee function and daily activity ability in older adults following total knee arthroplasty [J]. *Res Nurs Health*, 2023, 46 (2): 203–209. DOI: 10.1002/nur.22290.
- [31] Yeung LF, Ockenfeld C, Pang MK, et al. 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 (1): 51. DOI: 10.1186/s12984-018-0394-7.
- [32] 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]. *J Neuroeng Rehabil*, 2011, 25 (4): 378–385. DOI: 10.1177/1545968310388666.
- [33] Liu XJ, Sun JN, Wang QC, et al. Hyperbaric oxygen combined with mindfulness-based stress reduction training for spinal cord injury [J]. *Chin J Orthop Surg*, 2021, 29 (8): 753–755. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2021.08.19.
- [34] Bersch I, Alberty M, Fridén J. Robot-assisted training with functional electrical stimulation enhances lower extremity function after spinal cord injury [J]. *Artif Organs*, 2022, 46 (10): 2009–2014. DOI: 10.1111/aor.14386.
- [35] Rahimi M, Torkaman G, Ghabaee M, et al. Advanced weight-bearing mat exercises combined with functional electrical stimulation to improve the ability of wheelchair-dependent people with spinal cord injury to transfer and attain independence in activities of daily living: a randomized controlled trial [J]. *Spinal Cord*, 2020, 58 (1): 78–85. DOI: 10.1038/s41393-019-0328-7.
- [36] Charbonneau R, Loyola-Sanchez A, McIntosh K, et al. Exoskeleton use in acute rehabilitation post spinal cord injury: A qualitative study exploring patients' experiences [J]. *J Spinal Cord Med*, 2022, 45 (6): 848–856. DOI: 10.1080/10790268.2021.1983314.
- [37] Swank C, Holden A, McDonald L, et al. Foundational ingredients of robotic gait training for people with incomplete spinal cord injury during inpatient rehabilitation (FIRST): A randomized controlled trial protocol [J]. *PLoS One*, 2022, 17 (5): e0267013. DOI: 10.1371/journal.pone.0267013.
- [38] Shin JC, Jeon HR, Kim D, et al. Effects on the motor function, proprioception, balance, and gait ability of the end-effector robot-assisted gait training for spinal cord injury patients [J]. *Brain Sci*, 2021, 11 (10): 1281. DOI: 10.3390/brainsci11101281.
- [39] Yıldırım MA, Öneş K, Gökşenoğlu G. Early term effects of robotic assisted gait training on ambulation and functional capacity in patients with spinal cord injury [J]. *Turk J Med Sci*, 2019, 49 (3): 838–843. DOI: 10.3906/sag-1809-7.
- [40] Xiang XN, Zong HY, Ou Y, et al. Exoskeleton-assisted walking improves pulmonary function and walking parameters among individuals with spinal cord injury: a randomized controlled pilot study [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18 (1): 86. DOI: 10.1186/s12984-021-00880-w.