Artificial Intelligence and Robotics Research 人工智能与机器人研究, 2025, 14(4), 928-934
Published Online July 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/airr
https://doi.org/10.12677/airr.2025.144088

Hans汉斯

下肢外骨骼机器人在脑卒中康复中的应用进展

赵晓铃，高永久，李政阳，李欣蕊，刘寒峭，沈忠飞*

嘉兴大学医学院，浙江 嘉兴

收稿日期：2025年6月4日；录用日期：2025年7月17日；发布日期：2025年7月29日

摘　要

近年来，下肢外骨骼机器人作为一种创新型的康复辅助工具，在脑卒中患者的康复治疗中受到了广泛关注。本文详细探讨了下肢外骨骼机器人的研发历程、当前应用及其未来发展方向。当前应用包括显著提升脑卒中患者的步行能力、心肺健康水平和日常活动能力。研究显示，尽管下肢外骨骼机器人在脑卒中康复中展现出广阔的应用潜力，但仍面临技术难题、使用者接受度、个体差异及经济成本等挑战。未来发展方向包括技术创新改进、个性化治疗方案设计、智能化控制系统发展及跨学科合作深化。要实现理想的康复效果，仍需克服技术瓶颈、个性化需求匹配及经济可行性等问题。

关键词

外骨骼机器人，脑卒中，康复，步行能力

The Application Progress of Lower Limb Exoskeleton Robot in the Field of Stroke Rehabilitation

Xiaoling Zhao, Yongjiu Gao, Zhengyang Li, Xinrui Li, Hanqiao Liu, Zhongfei Shen*

College of Medicine, Jiaxing University, Jiaxing Zhejiang

Received: Jun. 4th, 2025; accepted: Jul. 17th, 2025; published: Jul. 29th, 2025

Abstract

In recent years, lower limb exoskeleton robots have received widespread attention in the rehabilita-

*通讯作者。

文章引用: 赵晓铃, 高永久, 李政阳, 李欣蕊, 刘寒峭, 沈忠飞. 下肢外骨骼机器人在脑卒中康复中的应用进展[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(4): 928-934. DOI: 10.12677/airr.2025.144088

tion treatment of stroke patients as an innovative rehabilitation auxiliary tool. This article discusses in detail the research and development history, current applications and future development directions of lower limb exoskeleton robots. Current applications include significantly improving the walking ability, cardiopulmonary health level and daily activity ability of stroke patients. Research shows that although lower limb exoskeleton robots show broad application potential in stroke rehabilitation, they still face challenges such as technical difficulties, user acceptance, individual differences and economic costs. Future development directions include technological innovation and improvement, personalized treatment plan design, intelligent control system development and deepening of interdisciplinary cooperation. To achieve ideal rehabilitation results, problems such as technical bottlenecks, personalized demand matching and economic feasibility are still needed.

Keywords

Exoskeleton Robot, Stroke, Rehabilitation, Walking Ability

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

近年来，下肢外骨骼机器人作为一种新型康复辅助工具，在脑卒中患者的康复治疗中受到了广泛关注，并且得到了广泛应用。它的发展历史能追溯到 20 世纪 60 年代，外骨骼刚开始设计主要用于军事和工业，随着技术的进步，外骨骼设备的应用范围逐渐扩展到医疗康复领域，特别是在 20 世纪 80~90 年代，机械工程和控制系统理论的发展使得外骨骼机器人开始被用于康复训练，早期的设备主要用于提供被动运动支持，帮助患者进行基本的肢体活动[1]。

进入 21 世纪，下肢外骨骼机器人的设计和技术得到了显著改进。这一时期的研究集中在提升设备的主动助力功能和智能化控制上。例如，具有主动助力功能的下肢康复外骨骼机器人可以根据患者的运动意图提供适时支持，使患者能够在更自然的状态下进行运动训练，从而促进康复效果[2]。高学山等研究者指出，肢体康复机器人能够提供持续且重复的训练模式，帮助患者重新构建受损神经系统，提高大脑认知功能，更有效地恢复肢体运动能力[3]。在这一阶段，随着人工智能技术的不断发展，智能化控制逐渐成为下肢外骨骼机器人的关键发展方向。王雨辉等研究表明，康复机器人在帮助脑卒中患者改善步态方面具有重要作用，这类设备不仅能提升康复训练的效率与成效，还能为患者康复提供有力支撑[4]。王艳等对下肢外骨骼机器人在脑卒中患者康复各阶段步行训练中的应用进行了深入研究，强调了此类设备在整个康复过程中的关键作用[5]。

目前，下肢外骨骼机器人在临床实践中的应用越来越广泛，证明了其在康复训练领域的有效性。石男强等人的研究表明，借助下肢康复机器人开展运动功能训练，不仅能较为精准地评估脑卒中患者的康复情况，还能提升康复治疗效率，节约医疗资源[6]。王静等人剖析了下肢外骨骼康复机器人当前的临床应用状况，指出这类设备在进行运动训练时呈现出独特优势，如提高患者参与度和依从性，增强康复效果[7]。随着新型材料的不断出现和人工智能技术的进步，下肢外骨骼机器人的设计也在不断优化。例如，轻量化设计和多功能性的提升使得这些设备更加适配患者的个性化需求[8]。魏小东等人的研究显示，穿戴型下肢外骨骼机器人越来越受到研究人员的关注，这些设备不仅支持脑卒中患者完成日常活动，还能减少患者对家庭和社会资源的依赖，减轻相关负担[9]。

2. 下肢外骨骼机器人在脑卒中患者康复领域的应用现状

2.1. 改善步行能力

下肢外骨骼机器人在提升脑卒中患者步行能力方面成效较为明显。研究表明，借助这类设备开展康复训练，可有效提高患者的步行速度、步频以及跨步长度。例如，Nam 等对慢性期脑卒中患者进行 4 周外骨骼步行训练(每次 30 min，每周 5 次)，治疗结束后，患者 6 min 步行距离从 90.57 ± 69.22 m 增加到 110.36 ± 77.01 m，步行速度和功能步行等级亦有明显改善[10]。戚朋顺等对 86 名脑卒中偏瘫患者展开研究，结果显示，在接受为期 8 周的下肢外骨骼机器人康复训练后，实验组在 6 分钟步行试验和 10 米步行测试中的成绩显著优于对照组，具体表现为步频和步速有明显提高[11]。此外，李新科等对 10 名偏瘫患者的研究发现，患者穿戴外骨骼机器人后，患侧跨步长度增加，支撑相持续时间减少，摆动相时间相应延长，步态的时空参数不对称性也有所降低[12]。Hiroki 等研究发现，通过下肢外骨骼康复机器人对脑卒中偏瘫患者进行康复训练，可以有效纠正患者的异常步态，更好地改善患者的步行能力[13]。由此可见，下肢外骨骼机器人不仅有助于改善患者的行走能力，还能促进步态的均衡协调，推动整体运动表现的改善。龙建军等在一项针对 30 例偏瘫患者的研究中证实，经过下肢外骨骼机器人训练后，患者的步行速度和步频均有提升，同时支撑相持续时间明显缩短，研究显示，该变化具有统计学意义($P < 0.05$)，验证了外骨骼机器人在提升步行功能方面的有效性[14]。这些研究结果一致表明，外骨骼机器人在提高脑卒中患者步行能力方面具备显著的临床应用潜力。

从作用机制来看，外骨骼机器人通过提供外部支撑与动力辅助，帮助脑卒中患者克服运动功能障碍，促进神经系统发生可塑性变化，从而有效改善步行能力。樊涛的研究指出，下肢外骨骼机器人训练不仅能显著增强患者的神经可塑性，还与其步行功能的恢复密切相关[15]。任永利等人发现，悬吊训练联合下肢外骨骼机器人干预对脑卒中偏瘫患者具有协同效应，可改善患者平衡功能，提高下肢运动能力，进而改善其步行表现和提升日常生活自理水平[16]。此外，洪雅晴等通过 Meta 分析表明，外骨骼机器人训练对脑卒中患者的时空步态参数具有显著改善作用，能够有效提升步行能力，尤其是病程较短的患者，这种干预措施的效果更为突出[17]。刘龙等的研究也显示，外骨骼机器人在偏瘫亚急性期患者中能显著提升步行能力，表现为运动功能和平衡功能的增强[18]。

尽管多项研究表明外骨骼机器人能够显著提升脑卒中患者的步行能力，但不同研究之间的效果差异值得关注。例如，Nam 等的研究显示步行速度和步频有明显改善，而李新科等则指出患侧跨步长度增加与支撑时间减少更为显著。这表明，不同的训练方案、设备类型及患者个体差异可能对外骨骼机器人的疗效产生重要影响。因此，在制定个性化治疗计划时，需综合考虑这些因素以优化康复效果。

虽然目前多数研究样本量较小、观察周期有限，但是下肢外骨骼机器人在临床应用中的可操作性和安全性已初步得到证实，随着技术的不断进步和高质量临床证据的逐步积累，相信其在改善脑卒中患者步行能力方面的潜力将日益显现。

2.2. 提升心肺功能

近年来，下肢外骨骼机器人在改善脑卒中患者心肺功能方面的应用已取得显著进展。除了步行能力的恢复，心肺耐力的增强也被视为外骨骼机器人康复训练的重要成效之一。通过调节训练强度，该设备可有效引发心率与摄氧量的变化，从而提高脑卒中患者的心肺适应性与耐受力。已有研究指出，基于外骨骼机器人的高强度运动干预能够显著提升脑卒中患者的心肺功能水平，进一步支持其在综合康复中的应用价值[19]。例如，Stoller 等[20]发现，4 周机器人步行训练后，卒中患者峰值摄氧量增加 17.8%，峰值呼吸商、每分通气量均较治疗前有明显改善。张大伟等人的一项研究表明，接受下肢步行外骨骼机器人

训练并结合呼吸训练的患者，在峰值摄氧量、峰值分钟通气量及无氧阈等心肺功能指标上均显著优于未接受该综合干预的对照组[19]。这表明，下肢外骨骼机器人不仅能改善患者的运动功能，还具备提升其心肺健康水平的积极作用。

2.3. 增强日常活动能力

下肢外骨骼机器人在帮助脑卒中患者提升日常生活能力方面也受到了广泛关注。郭冰菁强调，运动康复在脑卒中患者神经通路重建过程中发挥着关键作用，并指出康复机器人具备根据个体差异制定精准干预策略的能力，有望进一步增强日常活动能力，提升康复效果[21]。武德等人针对 96 名脑卒中患者展开的研究发现，将本体感觉神经肌肉促进疗法(PNF)与下肢外骨骼机器人训练结合起来的综合治疗方案，对改善患者的下肢运动功能及日常生活活动能力有显著帮助[22]。PNF 是一种通过刺激人体的感觉受器(如肌肉、关节的感受器)来增强神经肌肉反应的技术，旨在促进相关肌肉收缩和关节运动，从而改善运动功能。与单一模式的康复训练相比，将 PNF 与外骨骼机器人疗法结合的干预方式在改善患者日常活动能力方面效果更好，评分差异具有统计学意义。这表明，联合疗法不仅能更有效地提升脑卒中患者的运动功能，还能显著提高其日常生活能力。

谢红志团队的研究纳入了 60 例脑卒中偏瘫患者，结果显示，使用下肢外骨骼机器人进行康复训练不仅有效提高了患者的功能性步行能力，还提升了其日常生活能力评分[23]。这些研究结果表明，外骨骼机器人不仅能增强患者的独立性，还能显著改善其生活质量。

郑春利等人的研究进一步显示，将外骨骼机器人步态训练系统与经颅直流电刺激(tDCS)结合使用，在促进脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复方面疗效显著，再次验证了机器人辅助训练在实际应用中的有效性[24]。此外，彭小柯等学者通过 Meta 分析也证实，外骨骼机器人训练能够改善脑卒中患者的平衡控制和下肢运动功能，为该技术在提升患者日常自理能力方面的应用提供了有力证据支持[25]。

李豫等人的研究同样指出，将外骨骼机器人与传统康复训练相结合，可以更有效地促进卒中后偏瘫患者下肢功能的恢复，并提升其日常生活能力[26]。Ferreira 等采用下肢外骨骼康复机器人对脑卒中偏瘫患者进行康复训练，研究发现下肢外骨骼康复机器人可以有效提高患者的日常活动能力、运动功能和平衡功能，促进机体各项指标均不同程度地改善[27]。

综合多项研究成果可见，下肢外骨骼机器人在改善脑卒中患者的日常活动功能方面具有明显优势。通过提供外部支撑与动力辅助，这类设备能够帮助患者更顺利完成各类生活动作，从而全面提升其生活质量。值得注意的是，尽管下肢外骨骼机器人在提升脑卒中患者日常生活活动能力方面显示出一定积极效果，但其实际应用仍受到多种因素的制约。目前康复机器人尚难以完全适应患者的个体差异，尤其对于肌力较弱或平衡能力较差的患者，设备的支持效果可能有限。此外，部分系统操作相对复杂，需要较长的适应时间，也影响了其在临床中的广泛应用。因此，在制定康复方案时，应结合患者的具体功能状态和设备的技术特点，以提高干预的适配性和有效性。

2.4. 改善平衡功能与协调性

下肢外骨骼机器人不仅在提升脑卒中患者步行能力方面表现出良好效果，在改善其平衡功能与运动协调性方面也展现出可观的干预成效。王艳艳的研究表明，外骨骼机器人训练有助于提高脑卒中患者的平衡控制能力和动作协调性，从而有效推动下肢功能的整体康复[28]。该研究对 61 例脑卒中偏瘫患者进行干预后发现，观察组在平衡功能及步态参数等方面的改善均优于对照组。汪宗保等人对下肢外骨骼机器人在脑卒中康复中的临床应用进行了系统归纳，特别指出该技术在增强患者平衡能力与协调控制方面的积极作用[29]。

朱志伟等人的研究显示，将外骨骼机器人训练与 Bobath 技术相结合，能够有效改善脑卒中偏瘫患者的步态特征、平衡能力以及下肢运动功能[30]。杨玲玲等则探讨了下肢康复机器人在步态训练中的具体应用情况，强调其在促进神经可塑性方面的重要意义[31]。此外，胥怀宇等的研究表明，外骨骼机器人提供的分离运动训练对脑卒中偏瘫患者的下肢功能康复具有显著影响，进一步验证了其在康复治疗中的广阔应用潜力[32]。

3. 下肢外骨骼机器人在脑卒中患者康复领域的挑战与未来展望

3.1. 目前面临的挑战

尽管下肢外骨骼机器人在脑卒中患者的康复治疗中展现出良好的应用潜力，但仍面临诸多技术与实践层面的挑战。当前设备在运动协调性、感知精度及人机交互柔顺度方面仍存在不足，影响训练效果和患者参与度。研究表明，人机界面的有效控制对评估外骨骼机器人动作表现和力量输出具有重要意义，而控制策略的局限性是技术发展的主要障碍之一[1] [2]。此外，患者依从性不高、个体差异显著以及高昂的设备成本等问题也不容忽视。传统康复方式操作复杂且效率较低，容易降低患者的配合意愿；而脑卒中患者的步态特征和康复需求存在较大差异，传统控制方法难以满足个性化干预的要求[3] [33]。因此，提升系统智能化水平、优化控制算法、增强人机交互体验，并构建更具适应性的康复体系，是实现精准干预和提高疗效的关键方向。

在明确技术挑战的基础上，推动下肢外骨骼机器人在脑卒中康复中的实际应用，需重点解决人机交互柔顺度不足的问题。为解决人机交互柔顺度不足问题，一方面可以通过改进传感器技术，实现更精准的动作捕捉和反馈；另一方面，开发基于人工智能的自适应控制系统，使得设备能根据用户的实时状态自动调整支持力度，从而提供更加自然流畅的体验。此外，降低制造成本可通过采用新材料、简化设计结构以及批量生产等方式实现，如魏小东等人提出的新型穿戴式下肢外骨骼机器人设计，就体现了轻量化和多功能化的趋势，有助于降低成本并提高设备普及率。

3.2. 展望未来方向

随着新型材料、人工智能和生物传感技术的发展，外骨骼机器人正朝着轻量化、多功能化和智能化的方向不断演进。能源续航、安全性、舒适性、个性化与智能化控制、模块化设计以及人机耦合能力等已成为关键技术突破的重点[1] [33]。通过传感器与生物反馈技术的融合，外骨骼机器人能够更准确地识别患者的运动意图，提供自然、安全的辅助训练[34]。王艳等人指出，外骨骼机器人在改善脑卒中患者步行功能方面具有一定潜力，并强调多学科协作对于解决临床难题的重要性[5]。智能肢体康复机器人可提供高强度重复性训练，已被证实有助于神经重塑和功能恢复，推动个性化康复方案的制定[3]。然而，当前依然存在人机协同不顺畅、感知精度不够等问题，优化控制策略、提高人机交互性能成为研究的重点[35]。随着康复医学、工程学、人工智能等领域的深度融合，未来的研究将更加系统化与综合化。

为进一步提升临床适用性和康复效果，还需持续优化控制策略、增强人机协同能力，同时通过技术创新和生产工艺改进来降低制造成本，提高设备可及性。借助新型材料和先进的制造工艺，可以有效降低成本并提高设备的普及率[2]。随着技术的不断进步和跨领域合作的深入，下肢外骨骼机器人将在提升康复质量、减轻医疗负担等方面发挥越来越重要的作用，成为脑卒中康复领域的重要支撑工具。综上所述，下肢外骨骼机器人在脑卒中康复中的发展需要聚焦于性能提升、人机交互优化、个性化干预及成本控制等多个方面，以推动其实现更广泛高效的临床应用。为促进下肢外骨骼机器人在脑卒中康复领域的更广泛应用，需从技术路径与社会支持两方面协同推进。在技术研发层面，应加强生物工程学、材料科学与计算机科学等跨学科融合，通过多领域知识整合开发兼具效率与成本效益的解决方案，如结合柔性

材料与轻量化设计理念可提升设备适配性，而人工智能算法的优化则能增强人机交互的精准性。人工智能算法的优化可以帮助外骨骼机器人更准确地理解使用者的动作意图，通过分析传感器采集到的身体运动信号，系统能够自动调整动作节奏和辅助力度，使设备与患者的配合更加协调自然。在政策支持层面，政府与医疗机构需共同制定激励机制，一方面通过产学研合作加速技术成果转化，另一方面可通过医保覆盖、设备补贴等措施降低患者使用门槛，从而推动该类康复设备从实验室研究向临床普及的转化进程。

基金项目

2025 年浙江省大学生科技创新活动计划项目(2025R417A020)，2024 年嘉兴大学大学生研究训练计划项目(8517241023)。

参考文献

[1] 王华军, 胡连信, 王泽峰, 等. 下肢医疗康复外骨骼机器人的研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2025, 46(1): 88-100.

[2] 郭毅锋, 邓凯, 黄丽敏, 等. 主动助力下肢康复外骨骼机器人研究现状[J]. 机械传动, 2025, 49(5): 161-176.

[3] 高学山, 刘开源, 赵鹏, 等. 肢体康复机器人技术与发展趋势[J]. 广西科学, 2024, 31(5): 823-832.

[4] 王雨辉, 杨玉凤, 闫润润, 等. 康复机器人辅助脑卒中患者步态重建训练的研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(10): 83-88.

[5] 王艳, 吴珊红, 宫子涵. 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[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2023, 23(1): 22-28.

[6] 石男强, 刘刚峰, 郑天骄, 等. 下肢康复机器人的研究进展与临床应用[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 43-53.

[7] 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(1): 7-13.

[8] 张萌琦, 杨继鹏, 魏文彤, 等. 人工智能应用于脑卒中患者下肢功能障碍的研究进展[J]. 中风与神经疾病杂志, 2021, 38(12): 1129-1131.

[9] 魏小东, 喻洪流, 孟青云, 等. 一种新型穿戴式下肢外骨骼机器人的设计[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(3): 310-313+317.

[10] Nam, Y., Lee, J.W., Park, J.W., Lee, H.J., Nam, K.Y., Park, J.H., *et al*. (2019) Effects of Electromechanical Exoskeleton-Assisted Gait Training on Walking Ability of Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **100**, 26-31. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.06.020

[11] 戚朋顺, 徐亚宁, 耿兵将, 等. 下肢外骨骼机器人在脑卒中偏瘫患者康复中的应用及效果观察[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2024, 5(6): 1124-1129.

[12] 李新科, 吕晓, 龙建军, 等. 下肢外骨骼康复机器人对偏瘫患者步态时空参数不对称性的影响[J]. 现代实用医学, 2021, 33(7): 879-880+981.

[13] Tanikawa, H., Ohtsuka, K., Mukaino, M., Inagaki, K., Matsuda, F., Teranishi, T., *et al*. (2016) Quantitative Assessment of Retropulsion of the Hip, Excessive Hip External Rotation, and Excessive Lateral Shift of the Trunk over the Unaffected Side in Hemiplegia Using Three-Dimensional Treadmill Gait Analysis. *Topics in Stroke Rehabilitation*, **23**, 311-317. https://doi.org/10.1080/10749357.2016.1156361

[14] 龙建军, 王玉龙, 王同, 等. 下肢外骨骼康复机器人对偏瘫患者步态参数的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(9): 1107-1110+1117.

[15] 樊涛. 下肢外骨骼康复机器人训练对脑卒中偏瘫患者神经可塑性及下肢运动功能的影响[D]: [博士学位论文]. 广州: 南方医科大学, 2021.

[16] 任永利, 王信亭, 朱崇田. 悬吊联合下肢外骨骼机器人对脑卒中后偏瘫患者下肢运动功能的影响[J]. 内蒙古医学杂志, 2023, 55(11): 1379-1381+1385.

[17] 洪雅晴, 刘铨权, 张清芳, 等. 下肢外骨骼机器人对脑卒中患者时空步态影响的 Meta 分析[J]. 中国康复, 2023, 38(12): 739-747.

[18] 刘龙, 何万军, 田雪峰. 外骨骼机器人对偏瘫亚急性期患者步行能力及步态生物力学的影响[J]. 保健医学研究与实践, 2024, 21(S1): 68-72.

[19] 张大伟, 李杰, 董洁, 等. 下肢步行外骨骼机器人配合呼吸训练对脑卒中患者心肺及运动功能的影响[J]. 临床医

学研究与实践, 2024, 9(23): 46-49+150.

[20] Stoller, O., de Bruin, E.D., Schindelholz, M., Schuster-Amft, C., de Bie, R.A. and Hunt, K.J. (2015) Efficacy of Feedback-Controlled Robotics-Assisted Treadmill Exercise to Improve Cardiovascular Fitness Early after Stroke: A Randomized Controlled Pilot Trial. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, **39**, 156-165. https://doi.org/10.1097/npt.0000000000000095

[21] 郭冰菁. 柔性下肢步态康复训练机器人人机共融理论研究[D]: [博士学位论文]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.

[22] 武德, 王永兵, 马晓磊. PNF 技术与下肢外骨骼康复机器人对脑卒中后下肢运动功能与步行能力的影响[J]. 医药论坛杂志, 2025, 46(4): 392-397.

[23] 谢红志, 董继革, 王战斌, 等. 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(6): 68-72.

[24] 郑春利, 金岩春, 张大伟. 外骨骼机器人步态训练系统联合经颅直流电刺激对脑梗死患者下肢运动功能及步行能力恢复的疗效研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(1): 60-68.

[25] 彭小柯, 赵国顺, 韩诗雨, 等. 外骨骼机器人对脑卒中患者平衡和下肢功能的影响 Meta 分析[J]. 康复学报, 2025, 35(2): 197-204.

[26] 李豫, 朱琳, 陈科容, 等. 下肢外骨骼机器人联合传统康复训练对脑卒中患者步行功能恢复的疗效观察[J]. 昆明医科大学学报, 2024, 45(7): 92-98.

[27] Ferreira dos Santos, L., Christ, O., Mate, K., Schmidt, H., Krüger, J. and Dohle, C. (2016) Movement Visualisation in Virtual Reality Rehabilitation of the Lower Limb: A Systematic Review. *BioMedical Engineering OnLine*, **15**, Article No. 144. https://doi.org/10.1186/s12938-016-0289-4

[28] 王艳艳. 下肢外骨骼康复机器人应用于脑卒中偏瘫下肢运动功能障碍患者的效果[J]. 中外医学研究, 2023, 21(6): 132-135.

[29] 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(7): 50-53.

[30] 薛亚峰, 郄淑燕, 王寒明, 等. 穿戴式外骨骼康复机器人结合 Bobath 技术对脑卒中偏瘫患者的影响[J]. 西部医学, 2024, 36(6): 846-849+854.

[31] 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(2): 221-224.

[32] 胥怀宇, 刘丽丽, 任志平. 外骨骼机器人分离运动训练对脑卒中偏瘫患者下肢功能康复的效果研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(3): 404-409.

[33] 陈芳, 黄俊豪, 吴文杰, 等. 下肢外骨骼机器人在脑卒中患者功能康复中应用进展[J]. 中国康复, 2023, 38(4): 243-247.

[34] Su, D., Hu, Z., Wu, J., Shang, P. and Luo, Z. (2023) Review of Adaptive Control for Stroke Lower Limb Exoskeleton Rehabilitation Robot Based on Motion Intention Recognition. *Frontiers in Neurorobotics*, **17**, Article ID: 1186175. https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1186175

[35] 王刚. 面向主动康复训练的下肢外骨骼结构设计与交互控制研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2024.