

外骨骼辅助联合肌肉激活技术在康复训练中的融合机制研究

贺文萱*, 石磊#, 丛树源

西安交通大学体育学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年12月18日; 录用日期: 2026年1月12日; 发布日期: 2026年1月20日

摘要

随着全球人口老龄化进程的加速以及慢性疾病发病率的持续攀升, 以废用性肌萎缩为代表的运动功能退化已成为影响人类健康寿命与生活质量的核心挑战之一。传统人工康复训练模式受限于治疗师体力、经验差异及训练过程难以量化等因素, 在训练精准性、一致性和可持续性方面面临瓶颈。以机器人技术为核心的现代康复工程, 特别是外骨骼辅助设备与肌肉激活技术的兴起, 为突破上述瓶颈提供了崭新路径。本文系统梳理了相关理论基础、技术实现路径、临床应用现状与挑战, 并结合我国“制造强国”与“健康中国”战略背景, 分析该融合技术的发展前景。研究认为, 深入探究并优化这一融合机制, 对于攻克肌萎缩康复中“机理不明、协调性训练难、人机耦合性差”等关键难题, 推动智慧康养体系建设, 具有重要的理论价值与现实意义。

关键词

外骨骼机器人, 肌肉激活技术, 康复训练, 融合机制, 人机协同, 神经肌肉康复, 文献综述

Research on the Fusion Mechanism of Exoskeleton Assistance Combined with Muscle Activation Technology in Rehabilitation Training

Wenxuan He*, Lei Shi#, Shuyuan Cong

School of Physical Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Received: December 18, 2025; accepted: January 12, 2026; published: January 20, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 贺文萱, 石磊, 丛树源. 外骨骼辅助联合肌肉激活技术在康复训练中的融合机制研究[J]. 生物医学, 2026, 16(1): 171-178. DOI: [10.12677/hjbm.2026.161018](https://doi.org/10.12677/hjbm.2026.161018)

Abstract

With the acceleration of global population aging and the continuous rise in the incidence of chronic diseases, motor function decline represented by disuse muscle atrophy has become one of the core challenges affecting human health expectancy and quality of life. Traditional manual rehabilitation training models are constrained by factors such as the physical strength and experience differences of therapists and the difficulty in quantifying the training process, facing bottlenecks in terms of training accuracy, consistency, and sustainability. Modern rehabilitation engineering centered on robotic technology, especially the rise of exoskeleton-assisted devices and muscle activation technologies, offers a new path to break through these bottlenecks. This paper systematically reviews the theoretical basis, technical implementation paths, current clinical application status and challenges of this technology, and, in light of China's "Manufacturing Powerhouse" and "Healthy China" strategic background, analyzes the development prospects of this integrated technology. The research suggests that in-depth exploration and optimization of this integrated mechanism are of significant theoretical and practical value for addressing key challenges in muscle atrophy rehabilitation, such as "unclear mechanisms, difficulty in coordination training, and poor human-machine coupling", and for promoting the construction of a smart health and elderly care system.

Keywords

Exoskeleton Robot, Muscle Activation Technology, Rehabilitation Training, Fusion Mechanism, Human-Machine Collaboration, Neuromuscular Rehabilitation, Literature Review

Copyright © 2026 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

慢性非传染性疾病(Non-communicable Diseases, NCDs), 如脑卒中、脊髓损伤、肌少症及由长期制动引发的废用性综合征, 已然构成我国乃至全球公共卫生体系的沉重负担。这些疾病常导致严重的运动功能障碍, 其中, 废用性肌萎缩——由于活动减少或神经支配减弱引起的肌肉质量、力量和功能的进行性丧失, 是影响患者功能独立性与生活质量的中心环节。传统的康复治疗高度依赖治疗师一对一的徒手操作与指导, 虽有其价值, 但在训练强度、频率、精准度及客观量化评估方面存在天然局限。更关键的是, 人体自身难以精确感知和区分特定肌肉内部肌纤维的活性状态, 使得针对性地激活“休眠”或“衰退”肌纤维变得异常困难[1]。

近年来, 以机器人技术、人工智能和生物传感技术交叉融合为特征的康复工程学迅猛发展, 为解决上述困境带来了革命性工具。其中, 可穿戴式外骨骼机器人能够为患者肢体提供稳定、可控且重复性的物理辅助或阻力, 帮助其完成日常功能性动作, 并确保运动轨迹的正确性。另一方面, 以功能性电刺激(Functional Electrical Stimulation, FES)、肌电触发电刺激(EMG-Triggered Stimulation)和局部/全身振动训练为代表的肌肉激活技术, 则致力于从神经肌肉系统内部入手, 直接激发运动神经元, 诱导肌肉收缩, 从而增强神经肌肉控制、减缓肌肉萎缩并改善本体感觉[2]。

将外骨骼辅助与肌肉激活技术相结合, 形成一个协同干预系统, 已成为康复工程领域的前沿研究方向。其基本构想在于: 外骨骼作为“外部引擎”, 提供宏观的运动框架和力学支持; 肌肉激活技术作为

“内部触发器”，进行微观的神经肌肉动员和协调性训练[3]。二者的有效融合，有望实现对患者从“被动辅助”到“主动参与”的平滑过渡，最终达到“人进机退”、最大化神经功能重塑与肌肉功能重建的康复目标[4]。

与此同时，国家战略层面的支持为这一领域注入了强劲动力。《中国制造 2025》将高性能医疗器械、机器人等列为重点发展领域，推动制造业向智能化、高端化转型。而《“健康中国 2030”规划纲要》则明确提出要发展智慧医疗、康复辅助器具产业，加强慢性病综合防控。康复机器人，特别是融合了多种生物反馈与刺激技术的智能康复系统，正处在两大国家战略的交汇点，其发展前景广阔。然而，尽管理念先进，但外骨骼辅助与肌肉激活技术的有效融合机制仍存在诸多待解之谜：中枢与外周二者如何在不同神经损伤层级上协同？它们的时序与剂量应如何匹配以实现最佳康复效益？其协同作用的神经生理与生物力学基础是什么？人机之间如何实现自然、高效、安全的耦合？为回答这些问题，本研究采用文献综述法，系统梳理现有研究成果，深入论述两者的融合机制，以期为未来的技术研发、临床实践及政策规划提供系统的理论参考与思路借鉴[5]。

2. 研究对象与方法

2.1. 研究对象

本研究的核心研究对象是“外骨骼辅助技术”与“肌肉激活技术”在神经肌肉康复领域，特别是针对废用性肌萎缩的融合应用机制。

首先，外骨骼辅助技术主要指用于上肢(肩、肘、腕、手)或下肢(髋、膝、踝)康复的、可穿戴的机器人设备。其研究焦点在于其仿生设计原理、人机交互接口、控制策略及其在康复训练中提供的“渐退式”辅助逻辑。而肌肉激活技术主要包括：神经肌肉电刺激技术，基于表面肌电信号反馈的触发式刺激技术和机械振动疗法。研究焦点在于其激活不同肌肉类型、动员运动单元及影响神经可塑性的机制。

融合机制指上述两项技术如何从系统集成、信息交互、控制协同及生物效应层面相互结合，形成一个“ $1+1>2$ ”的康复干预整体。重点探讨其在模拟和增强人体反射弧、实现人机协同运动控制、以及促进从局部肌肉激活到整体运动功能恢复方面的内在逻辑[6]。

2.2. 研究方法

本研究采用系统性文献综述法，通过定性综合的方式，对现有文献进行归纳、比较、分析和论述。检索时间范围设定为 2015 年 1 月至 2025 年 12 月，以确保涵盖近十年的关键进展。中文文献以中国知网(CNKI)、万方、维普数据库为主要来源；英文文献以 Web of Science Core Collection, IEEE Xplore, PubMed, Elsevier ScienceDirect 等数据库为主要来源。

初步检索获得相关文献约 1500 篇。经阅读标题和摘要后，按以下标准进行筛选：(1) 研究主题直接涉及外骨骼与肌肉激活技术中的至少一种在康复中的应用；(2) 优先选择探讨两种技术结合或对比的临床研究、实验研究或综述性文章；(3) 研究内容涉及作用机制、控制方法或临床效果评估；(4) 发表于同行评审期刊。最终纳入深度分析的文献共计 74 篇，其中中文文献 48 篇，英文文献 26 篇。

3. 研究结果

3.1. 外骨骼辅助技术的康复作用机制

外骨骼在康复中的作用远不止于“替代人力”或“提供助力”。其机制是多层次的；对于肌力严重不足的患者，外骨骼能够支撑肢体重量，对抗重力，使患者得以体验完整的关节活动范围和功能性动作模式。这打破了“无活动 - 进一步萎缩”的恶性循环，为神经重塑提供了必要的运动模式输入，提供了更

安全可控的运动环境与物理支持[7]。而机器人可以不知疲倦地引导患者进行成千上万次重复的标准动作练习，这对于依赖“练习依赖性可塑性”的脑功能重组至关重要。程序化的训练确保了剂量的一致性，有利于科研中对干预效果进行客观评价。先进的外骨骼采用阻抗控制或自适应控制算法，用以施加精准的阻力或助力，实现“渐退式”辅助。例如，当检测到患者主动发力增加时，系统可逐步减少辅助力矩，鼓励患者更多依靠自身力量完成任务。这种“刚好足够”的辅助原则，被认为是促进主动参与和运动学习的关键[8]。

作为多模态生物反馈的集成平台，现代外骨骼集成了多种传感器，不仅能监测关节角度、角速度、交互力等运动学或动力学参数，还能同步采集表面肌电信号、心率等生理信号。这些数据为实时调整训练难度、评估康复进展提供了量化依据，并将结果可视化反馈给患者和治疗师，增强治疗动机[9]。

3.2. 肌肉激活技术的康复作用机制

肌肉激活技术的作用靶点更侧重于神经肌肉系统的微观层面和生理过程，可以直接激活下运动神经元，诱发肌肉收缩；FES 通过表皮电极施加电流，直接兴奋支配目标肌肉的运动神经纤维，引发近乎生理性的肌肉收缩。这对于下运动神经元通路基本完整但上运动神经元受损的情况尤为有用，能防止失神经支配导致的肌肉快速萎缩，维持肌肉代谢和循环[10]。

研究显示，在运动尝试期间同步施加 FES，其传入感觉反馈能强化运动皮质的相应表征区域。肌电触发电刺激，更进一步，将患者的运动意图与实际肌肉输出强关联，被认为能更有效地促进运动-感觉环路的重建，增强了运动皮质兴奋性与大脑可塑性[11]。通过精心设计的多通道刺激序列，可以模拟拮抗肌的协同收缩模式，训练患者的协调能力。振动训练则主要通过刺激肌梭初级末梢，强烈兴奋 α 运动神经元，引起强直性振动反射(Tonic Vibration Reflex, TVR)，改善肌肉协调与选择性激活同时增强本体感觉输入。这种输入对提高关节位置觉、运动控制精度和平衡能力有积极影响。而不同的电刺激参数和振动频率可能对不同类型的肌纤维产生选择性影响，为个性化干预提供了可能[12]。

3.3. 外骨骼与肌肉激活技术的融合机制

二者的融合不是机械并列，而是旨在创建一种超越单一技术的、动态交互的康复生态系统。外骨骼模拟“感受(传感器)-中枢(控制器)-效应(执行器)”的机器反射弧。它感知人体运动状态或意图，通过算法决策，输出辅助力矩。肌肉激活技术则直接介入人体本身的“感受器(肌梭等)-中枢(脊髓/脑)-效应器(肌肉)”生理反射弧[13]。它通过电或机械刺激，增加感觉输入或直接引发运动输出。融合系统的关键在于将这两个“反射弧”在时间和空间上进行融合。例如，在外骨骼辅助患者进行伸膝动作时，同步对股四头肌进行 FES 或振动。此时，外骨骼提供的力学支持确保了动作的完成度，而肌肉激活技术则强化了该动作对应的特定肌群的神经驱动和本体感觉输入。这种“内外夹击”的模式，可能在大脑和脊髓层面产生更强的协同激活与学习信号[14]。

人机协同控制层面的信息融合是实现高效融合的技术核心。融合系统需要处理来自外骨骼传感器和来自人体生理信号的多模态信息。基于肌电的协同控制是一种常见策略。系统实时解码患者的表面肌电信号，将其幅值或模式作为患者“运动意图”和“努力程度”的指标。然后，控制器综合肌电信号和当前运动状态，动态分配外骨骼的辅助力矩和肌肉激活技术的刺激强度。例如，当检测到肌电信号微弱时，系统可能提供较高的外骨骼助力并辅以较强的 FES 以诱发收缩；随着肌电信号增强，则逐步降低外骨骼助力与 FES 强度，将主导权交还给患者。基于模型或学习的自适应控制则更为先进。系统通过学习建立患者个性化的神经肌肉骨骼模型，预测在不同任务下所需的辅助/刺激组合，实现更自然、更前瞻性的人机协作[15]。

康复目标层面中，在增强肌力与耐力方面，外骨骼通过提供可控的过载或辅助，设定训练的力学负荷；肌肉激活技术则确保在负荷下目标肌群能被充分动员和激活，提高训练效率[16]。在改善协调性与运动模式方面，外骨骼引导正确的整体运动轨迹；多通道肌肉激活技术则可精细调节特定肌肉的激活时序与强度，纠正异常的协同收缩，训练更接近正常的肌间协调模式[17]。在促进感觉-运动整合方面，外骨骼运动提供的本体感觉与肌肉激活技术提供的强烈本体感觉输入相结合，能向中枢神经系统输送更丰富、更一致的感觉反馈，这对于重建准确的身体图谱和运动控制至关重要[18]。

3.4. 融合技术在应对废用性肌萎缩中的特殊价值与初步证据

废用性肌萎缩的核心病理生理改变包括：蛋白质合成减少、降解增加；运动单位募集减少、放电频率下降；肌肉内毛细血管网减少、代谢改变。融合技术对此提供了多靶点干预：

外骨骼使患者在早期、肌力极弱时即可进行功能性活动，提供了维持肌肉质量和代谢所必需的机械负荷。肌肉激活技术，特别是 FES，能够直接靶向激活那些因神经驱动减弱而处于“休眠”状态的肌纤维，精准“唤醒”萎缩肌纤维，逆转其萎缩进程。而机械负荷与神经电刺激的结合，已被一些基础研究提示可能在分子层面产生协同效应，更有效地上调肌肉合成代谢信号通路，同时增强神经肌肉接头的稳定性，协同促进神经肌肉适应。融合系统通常更具互动性和游戏化潜力，能提供即时反馈，使枯燥的重复训练变得更有趣味，提升训练动机与依从性，这对于需要长期坚持的慢性病康复至关重要。

现有文献中已出现一些支持性临床前研究和初步临床试验。例如，有研究对比了单纯外骨骼步行训练与外骨骼结合功能性电刺激对脊髓损伤患者下肢肌肉厚度和步行参数的影响，发现融合组在股四头肌肌围增长和步行速度改善方面有更优趋势[19]。另一项针对卒中后上肢康复的研究显示，结合肌电触发刺激的外骨骼训练，比单纯外骨骼训练更能改善患者腕背伸的主动关节活动范围和表面肌电激活程度。

4. 讨论与分析

4.1. 融合机制的神经科学与生物力学基础

融合机制的成功，根植于对神经可塑性和生物力学原理的深刻理解。从神经科学角度看，康复的本质是驱动中枢神经系统，特别是大脑皮质和脊髓，发生适应性重组[20]。融合技术通过提供“增强的感觉反馈”与“成功的运动体验”，创造了理想的“学习-依赖可塑性”环境。这种密集的、任务特异性的、伴有积极反馈的训练，有助于强化和拓宽过度损伤区域或新形成的神经连接[21]。

从生物力学角度看，人体运动是神经系统控制下肌肉、骨骼、关节构成的复杂动力学系统的产物[20]。融合技术允许康复工程师和临床医生以前所未有的精度来“调试”这个系统：外骨骼可以修正异常的关节力矩和运动轨迹，而肌肉激活技术可以调整特定肌肉的刚度和激活时序[22]。二者的结合，使得在个体层面优化“神经控制策略”与“肢体力学输出”之间的匹配成为可能，这是传统方法难以企及的。

4.2. 融合之路上的主要障碍

尽管前景光明，但实现真正高效、安全、用户友好的融合仍面临显著挑战：人体是一个非线性、时变的动力学系统。如何让刚性或柔性的外骨骼机械系统与充满生物黏弹性的机体软组织实现“共融”，避免运动中的冲击、迟滞和能量竞争，是一个根本性难题[23]。不恰当的耦合会导致患者不适、能量消耗增加甚至产生代偿模式[24]。而融合康复技术的发展正处在一个关键阶段，其核心目标是将刚性的机械辅助与柔性的生理激活无缝结合。要实现这一理想，首先必须解决人机间的动力学失配问题。传统刚性外骨骼易与人体软组织产生冲击和能量竞争，而前沿的柔性机器人技术，如基于气动织物或仿生肌腱的可变刚度驱动器，正致力于模拟人体肌肉的天然黏弹性。通过融合高密度肌电与实时超声成像，系统能够

在线估计个体的关节力学状态，从而实现外骨骼输出与人体内源力矩的动态“共融”，这为减少代偿、提升舒适度与能效提供了根本路径[25]。

其次还存在个体差异性与个性化适配的规模化难题；每位患者的损伤部位、程度、剩余功能、身体尺寸、心理状态都不同。理想的融合系统需要对其控制参数进行大量个性化调校。当前依赖于专家手动调参的模式难以规模化，而基于人工智能的自适应控制正成为破局关键。特别是强化学习算法，能让系统在与患者的持续交互中，自动优化辅助力度与刺激参数，形成量身定制的康复策略。目前这严重依赖专家经验，耗时费力，难以在临床大规模推广[26]。开发基于人工智能的自适应算法，实现系统的“自学”和“自调节”，是未来的关键突破方向[27]。目前对于“外骨骼辅助多少是合适的？”、“电刺激/振动应该在动作的哪个阶段施加、强度如何？”、“两种干预的时序如何配合最优？”等问题，尚缺乏坚实的神经生理学证据和清晰的剂量-效应关系。多数研究仍处于探索性阶段，缺乏大规模、长期、分层设计的随机对照试验来验证其优越性并制定临床指南。将多模态传感器、刺激器、高性能驱动器和复杂控制算法集成到一个轻便、舒适、美观的可穿戴设备中，是技术集成带来的成本与可及性问题；结合数字孪生技术，在虚拟空间中预先验证和优化方案，可大幅缩短临床调试周期，为实现“一人一策”的精准康复奠定工程基础。技术难度和制造成本高昂。这可能导致产品价格昂贵，限制其在基层医疗机构和家庭中的普及[28]。

4.3. 国家政策导向与产业生态构建

我国将康复机器人产业置于“制造强国”和“健康中国”战略的交汇点，这为融合技术的发展提供了前所未有的政策红利和市场空间。国家层面的重点研发计划、产业扶持基金正在向高端康复器械倾斜。同时，庞大的慢性病患者基数、日益增长的主动健康需求以及不断完善的医疗保障体系，共同构成了一个巨大的潜在市场。

这要求产学研医各方紧密合作：高校与研究机构应专注于机理探索和前沿技术创新；企业应致力于工程转化、产品迭代和成本控制；医疗机构应积极进行临床验证和反馈，探索新的康复服务模式，例如远程康复、社区康复等[29]。只有构建起良性的创新生态，才能将融合技术的理论潜力转化为实实在在的国民健康福祉。

5. 结论与展望

5.1. 结论

外骨骼辅助技术与肌肉激活技术在康复训练中具有内在的互补性与协同潜力。前者主要从生物力学层面提供外部支持与引导，后者主要从神经生理层面驱动内部激活与重塑。

二者的融合机制核心在于构建一个“外部机械-内部生理”协同作用的闭环系统，通过仿生与增强人体反射弧、实现多模态信息融合的智能控制，最终达到“按需辅助、人在环中、人进机退”的康复理念。这种融合技术在应对以废用性肌萎缩为代表的慢性运动功能障碍方面展现出独特价值，它能够同时针对“废用”的力学因素和“萎缩”的神经肌肉因素进行多靶点干预。技术的最终价值体现在其可及性上。将复杂的传感器、驱动器和控制算法集成到轻便、舒适且价格合理的设备中，是面向家庭与社区普及必须跨越的障碍。柔性电子与智能织物的成熟，使得传感器能够像普通衣物一样被穿戴；模块化与开源平台的设计理念有助于降低成本并加速创新。未来，通过边缘计算与云平台的协同，将复杂算法处理置于云端，可使终端设备更加轻量化，这将是推动高端康复技术惠及更广泛人群的必然趋势[30]。当前融合技术的发展仍面临人机耦合、个性化适配、机理不明和成本高等系列挑战，其全面临床应用尚需更多高质量证据支持。

5.2. 未来展望

基于当前研究现状与挑战，未来该领域的研究与发展应聚焦于以下几个方向：

(1) 利用神经影像学、高密度表面肌电、代谢组学等先进工具，深入研究融合干预对大脑皮质兴奋性、脊髓环路、肌肉蛋白质代谢网络的具体影响，阐明其促进康复的分子、细胞及系统水平机制，为优化干预方案提供科学依据。

(2) 大力发展基于机器学习，特别是强化学习、迁移学习和数字孪生技术的自适应控制算法。使系统能够根据患者的实时表现和长期趋势，自动、动态地调整外骨骼辅助策略与肌肉激活参数，实现真正的个性化康复。

(3) 新材料和新工艺的应用将使下一代融合设备更轻、更柔、更贴合人体，显著提升穿戴舒适度和长时间使用的依从性，为家庭和社区康复场景铺平道路。

(4) 推动设计严谨的多中心、大样本随机对照试验，建立针对不同病种、不同分期患者的融合康复临床路径和效果评价标准体系。同时，探索基于云平台和物联网的远程监控与指导模式，扩大优质康复资源的可及性。

(5) 康复机器人融合技术的发展亟需精通机械工程、控制科学、生物医学工程、临床康复医学、神经科学和心理学的复合型人才。加强学科交叉平台建设和人才培养，是推动该领域可持续发展的根本保障。

总之，外骨骼辅助联合肌肉激活技术的融合，代表了康复工程向智能化、精准化、人性化发展的必然趋势。它不仅是技术工具的革新，更是康复理念的升华——从替代到增强，从治疗到赋能。这一领域的突破必将源于机械工程、神经科学、临床医学与人工智能的深度交叉。它不仅是一场技术变革，更代表着康复理念从“外力替代”到“内在赋能”的范式升华[18]。通过构建“临床需求-基础研究-技术转化”的良性生态，我们有理由期待，融合康复技术将为应对老龄化社会挑战、提升全民健康福祉贡献关键力量。随着相关基础科学、核心技术与临床实践的不断突破，这一融合技术有望在建设“健康中国”、应对人口老龄化挑战的宏伟事业中，扮演愈发关键的角色，最终帮助更多患者重获自由行动的能力与尊严。

基金项目

资助信息国家社会科学基金资助课题(25BTY114)陕西省社会科学基金资助课题(2023Q003)陕西省重点研发计划项目资助课题(2024GX-YBXM-287)。

参考文献

- [1] 劳锦波. 下肢外骨骼康复机器人改善截瘫患者下肢功能障碍的临床研究[J/OL]. 中国典型病例大全: 1-5. <https://doi.org/10.20256/j.cnki.zgdxbl.20251205.010>, 2025-12-27.
- [2] 李畅, 郑义, 王优强, 等. 下肢康复外骨骼机器人研究现状及应用进展[J]. 机械传动, 2025, 49(11): 1-16.
- [3] 孙文. 外骨骼型下肢康复机器人结构设计与动力学分析[J]. 模具制造, 2025, 25(11): 234-236.
- [4] 宁飞龙, 李成栋, 李亨, 等. 下肢康复外骨骼机器人运动学与动力学分析[J]. 机械传动, 2025, 49(9): 93-101.
- [5] 王晓锋, 胡梦巧, 汪嫣, 等. 外骨骼机器人辅助步态训练对脑卒中和脊髓损伤下肢功能康复效果的系统综述[J]. 中国康复理论与实践, 2025, 31(0): 914-921.
- [6] 卢绍田, 张祥瑞, 陈超, 等. 基于障碍 Lyapunov 函数与 RBF 神经网络补偿的下肢外骨骼鲁棒控制[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版): 1-9. <https://link.cnki.net/urlid/50.1155.n.20250728.1222.002>, 2025-12-27.
- [7] 邓凯. 下肢康复外骨骼机器人关节运动控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 柳州: 广西科技大学, 2025.
- [8] 王昊. 下肢外骨骼康复训练机器人的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2025.
- [9] 黄钰轩. 主动式下肢外骨骼对人体能量代谢的影响与助力效果的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都体育学

- 院, 2025.
- [10] 马慧婷. 基于肌电信号协同作用的多关节运动意图识别研究[D]: [硕士学位论文]. 东莞: 东莞理工学院, 2025.
 - [11] 卢慧娟. 人机共融下肢外骨骼康复机器人设计与性能分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2025.
 - [12] 梁睿智. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人的结构设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
 - [13] 董婷婷, 王钰宏, 李维朝, 等. 外骨骼机器人在脊髓损伤患者康复领域中的应用综述[J]. 医疗卫生装备, 2025, 46(4): 100-107.
 - [14] 肖怀宇, 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.
 - [15] 胡晓红, 伍俊. 下肢外骨骼机器人在脊髓损伤患者康复过程中的应用及效果观察[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(2): 266-270, 275.
 - [16] 何件根, 武亮. 外骨骼机器人辅助康复训练对脊髓损伤患者的影响[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(2): 282-286.
 - [17] 程有亮, 曹诗沛, 陶璟. 康复下肢外骨骼人机耦合建模及助力效果仿真研究[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(1): 69-75.
 - [18] 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.
 - [19] 李智. 下肢外骨骼辅助步态训练对痉挛型脑瘫 SDR 术后患者步行能力影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 泸州: 西南医科大学, 2024.
 - [20] 李保坤, 陶珍钰, 卞云豪. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人设计与分析[J]. 兰州工业学院学报, 2024, 31(5): 65-69.
 - [21] 黄文辉, 徐英帅, 曾江, 等. 下肢康复外骨骼机器人结构设计与动力学仿真[J]. 机电工程技术, 2024, 53(10): 52-56.
 - [22] 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.
 - [23] 贾增钰. 髋关节外骨骼康复机器人的性能分析与控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 中北大学, 2024.
 - [24] 刘永柏. 基于人机自然交互的上肢外骨骼机构设计与控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2024.
 - [25] 徐乙铭. 下肢外骨骼康复机器人轨迹跟踪控制研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
 - [26] 王晨阳. 老年人下肢外骨骼智能辅具设计研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2024.
 - [27] 闫梦梦. 面向膝关节康复训练的刚柔耦合外骨骼机器人设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
 - [28] 王嘉琪. 下肢主动助力外骨骼感知与规划技术研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
 - [29] 刘瑞平, 欧阳钧. 下肢外骨骼康复机器人的发展和应用[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2023, 44(2): 354-360.
 - [30] 赵立铭. 基于张拉整体结构的仿生膝关节外骨骼设计与控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2022.