

# 下肢外骨骼相关辅具在行走障碍人群中的康复应用及发展

朱晨硕<sup>1</sup>, 陈奕诺<sup>1</sup>, 孔祥劲<sup>2</sup>, 孙筱冉<sup>3\*</sup>, 杨泽霖<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>青岛大学青岛医学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>青岛理工大学信息与控制工程学院, 山东 青岛

<sup>3</sup>不列颠哥伦比亚大学理学院, 加拿大 温哥华

收稿日期: 2025年6月13日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年7月29日

## 摘要

下肢外骨骼作为新型可穿戴康复辅具, 近年来在神经损伤及老年性步态障碍患者康复中的应用价值日益凸显。其通过机械结构或动力系统辅助下肢动作, 可改善步态功能、增强自主运动能力, 并在一定程度上促进神经可塑性。本文基于外骨骼系统中被动免荷(无动力)与主动免荷(有动力)两大核心分类, 系统梳理了其生物力学基础、结构特征及技术发展现状, 比较了两类系统在适用人群与控制方式上的差异, 并重点分析其在脑卒中、脊髓损伤及脑瘫等行走障碍人群中的康复应用。进一步探讨被动免荷外骨骼向智能化升级、主动免荷外骨骼向轻量化演进的双向发展趋势, 并分析其在人工智能、脑机接口(BCI)、功能性电刺激(FES)等前沿技术融合背景下的创新潜力。最后, 结合家庭及社区等多元化场景应用需求, 提出外骨骼康复辅具未来在标准体系建设、适配性优化等方面的发展方向。旨在为下肢外骨骼的临床转化与多学科研究提供理论支持与实践参考。

## 关键词

下肢外骨骼, 可穿戴康复辅具, 下肢矫形器, 康复应用

## The Rehabilitation Application and Development of Lower Limb Exoskeleton-Related Assistive Devices among People with Walking Disabilities

\*通讯作者。

文章引用: 朱晨硕, 陈奕诺, 孔祥劲, 孙筱冉, 杨泽霖. 下肢外骨骼相关辅具在行走障碍人群中的康复应用及发展[J]. 生物医学, 2025, 15(4): 853-866. DOI: 10.12677/hjbm.2025.154091

Chenshuo Zhu<sup>1</sup>, Yinuo Chen<sup>1</sup>, Xiangjing Kong<sup>2</sup>, Xiaoran Sun<sup>3\*</sup>, Zelin Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Qingdao Medical College of Qingdao University, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Faculty of Science, University of British Columbia, Vancouver Canada

Received: Jun. 13<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2025; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

As a novel wearable rehabilitation device, the lower-limb exoskeleton has demonstrated increasing clinical value in recent years for the rehabilitation of patients with neurological injuries and age-related gait disorders. By providing mechanical support or powered assistance to lower-limb movements, it can improve gait performance, enhance voluntary motor function, and, to some extent, promote neuroplasticity. Based on the two core categories of exoskeleton systems—passive unloading (non-powered) and active unloading (powered)—this review systematically summarizes their biomechanical principles, structural features, and current technological developments. It further compares the two systems in terms of applicable patient populations and control strategies, with a focus on their rehabilitation applications in individuals with stroke, spinal cord injury, and cerebral palsy. The paper also explores the bidirectional evolution trend: passive lower-limb exoskeleton advancing toward intelligent upgrades, and active lower-limb exoskeleton progressing toward lightweight and energy-efficient designs. In addition, it discusses the innovative potential of these systems under the integration of cutting-edge technologies such as artificial intelligence (AI), brain-computer interfaces (BCI), and functional electrical stimulation (FES). Finally, considering the growing demand for rehabilitation in home and community settings, the paper proposes future directions for exoskeleton assistive devices in terms of standardization, adaptability, and clinical implementation. This review aims to provide theoretical insights and practical references for the clinical translation and interdisciplinary development of lower-limb exoskeletons.

## Keywords

Lower-Limb Exoskeleton, Wearable Assistive Device, Lower-Limb Orthotic Device, Rehabilitation Application

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

随着脑卒中、脊髓损伤、脑瘫等神经系统疾病发病率上升，以及人口老龄化趋势加剧，行走障碍人群的规模不断扩大，对康复技术提出了更高要求[1]-[3]。现有康复手段如传统理疗、固定式矫形器、步态训练平台等，普遍存在结构刚性大、个体适配性差、康复效率低等问题，难以满足长期康复与自主训练的实际需求。

近年来，下肢外骨骼技术作为一种融合生物力学、控制工程与康复医学的穿戴式系统，逐渐成为康复工程领域的重要研究方向。其通过机械支撑、助力驱动、智能控制等方式辅助下肢活动，能够实现步态引导、力量补偿与神经激活，为运动功能障碍患者提供了新的康复路径。当前外骨骼系统主要分为两

类：被动免荷系统依靠结构设计提供稳定与支撑，主动免荷系统则基于驱动器与传感器实现动力输出与交互控制。二者在结构复杂度、适用人群、助力方式及能耗方面存在显著差异，均在各自的适应范围内发挥积极作用。

为了更好地推动下肢外骨骼在临床康复中的应用，本文将从理论原理、系统分类、核心技术与典型应用四个层面展开综述，重点分析其在脑卒中、脊髓损伤与脑瘫等患者中的实用效果与适配策略。同时，本文还探讨被动外骨骼向智能化方向的转型趋势、主动系统在轻量化与能效控制方面的关键突破，并结合人工智能、脑机接口、功能性电刺激等技术的发展，展望外骨骼辅具在家庭、社区等场景中的广泛应用前景，为实现个性化、低成本、高效率的康复提供理论依据。

## 2. 研究背景及研究意义

步行作为人类最基本的运动方式之一，深刻影响着个体的生活质量和独立性。步行能力的缺失通常反映了神经肌肉系统的严重障碍，因此步行功能被广泛视为衡量个体生活能力的核心指标。全球约有 10% 的人口受到不同程度的步行功能障碍影响，在我国，超过六成脑卒中患者在康复过程中仍然遗留步态异常[4]。随着人口老龄化加速，失能老年人口已突破 4000 万，这一趋势对下肢康复设备的需求产生了深远的影响，相关康复辅具市场的年均增长率超过 15% [5]。

膝关节作为人体主要的承重关节，结构复杂且运动频繁，易受损伤。膝关节的骨性关节炎等疾病已成为威胁中老年人群健康和生活质量的重要疾病，尤其在老龄化社会中愈加普遍。现有的药物和手术治疗手段对于膝关节疾病的治疗效果有限。传统康复手段如矫形器支撑、物理治疗和被动训练等在一定程度上能够帮助患者恢复功能，但这些方法往往存在着结构刚性大、难以满足个体功能差异、训练的重复性较低以及对康复师的依赖性强等局限。例如，脑卒中偏瘫患者常常出现膝关节过伸等步态异常，传统的矫形器在这种情况下难以提供有效的矫正，而通过引入下肢外骨骼能够显著改善步态偏差[6]。

随着生物力学、控制理论、现代材料科学以及康复医学等多学科快速发展，外骨骼技术，尤其是下肢外骨骼技术，逐步成为现代康复领域的重要研究方向。这类可穿戴设备通过外部骨架结构和驱动系统为患者提供机械支持或动力辅助，能够有效提升步行能力、减轻肢体负荷，并促进神经肌肉系统的功能恢复。下肢外骨骼的技术性能和适配性持续优化，正向智能化、个性化和实用化的方向发展。

在这种背景下，免荷下肢外骨骼作为一种安全且有效的保守治疗手段，通过调整关节力线和转移关节负载，能够有效地促进下肢的功能康复。

综上所述，本研究旨在深入探讨康复应用中的下肢外骨骼技术，通过设计优化、技术创新以及跨学科融合，进一步提高其临床适配性和治疗效果，从而为行走障碍患者提供更加高效、个性化的康复辅具。

## 3. 国内外研究现状

### 3.1. 被动免荷外骨骼

被动免荷外骨骼是指不依赖外部动力系统(如电机、液压、气动等)，而是通过自身机械结构的设计(如弹性支撑、杠杆、阻尼或限位装置等)，来重新分配或引导身体负载，实现对下肢关节(如膝关节、髋关节等)的支撑、稳定或应力转移，从而减轻肌肉负担或矫正异常步态。

随着全球老龄化进程加快及残障群体的逐步扩大，社会对矫形器与假肢等康复辅具的需求迅速增长。与此同时，材料科学、生物力学、机械工程、电子控制技术与康复医学等学科的交叉发展为矫形器设计提供了坚实的技术基础。欧美发达国家在这一领域高度重视，设立了众多科研机构与康复工程实验室专门从事辅助器具的研发与临床验证[7]。如美国退伍军人事务部、国家卫生研究院与国家自然科学基金会等，均设有专项资助计划，用于支持残障康复设备的开发，确保成果能够切实满足临床使用者的功能需求。

此外,国际市场上涌现出如奥托博克(Ottobock)、奥索(Össur)等著名企业,其代表性产品包括储能假脚、运动型人工膝关节、以及多类型免荷矫形器等,已实现商业化应用并形成完整产业链。

相比之下,我国在辅助器具领域仍处于追赶阶段。根据第二次全国残疾人抽样调查,我国肢体残疾人数已超过 2400 万,辅助器具的需求呈快速上升趋势。然而,目前我国在矫形器研发、生产、应用等方面尚存在以下问题:一是产品种类单一、规模有限,难以满足临床多样化的康复需求,现有矫形器使用率远低于欧美国家;二是装配机构数量少、区域分布不均,专业技术人员缺乏,且缺乏统一的医疗质量监督机制;三是国内大多数矫形器产品仍以模仿国外成熟设计为主,缺少自主研发与创新能力。虽然部分高校与科研单位已研发出少量创新型产品,但多数尚未进入临床实用阶段。

在国外,矫形器的设计、处方、适配与监督均由多学科康复团队协作完成,涵盖矫形外科医师、康复治疗师、假肢矫形师等多个专业角色,形成了完备的临床应用流程[8]。而在国内,类似制度与协同体系尚未建立,导致产品应用的标准化、系统化水平相对薄弱。

### 3.2. 主动免荷外骨骼

主动免荷外骨骼是依赖外部动力源(如电动机、人工肌肉等)与控制系统,主动为关节提供动力输出或力矩补偿,以实现运动辅助、站立支撑或步态引导等功能。下肢医疗康复外骨骼机器人作为一种具有颠覆性的医疗工程创新技术,为运动功能受损人群提供了全新的康复路径。

(1) 在国际康复领域,是否通过美国食品药品监督管理局(FDA)或欧洲 CE 认证,已成为衡量外骨骼机器人系统安全性与临床有效性的关键标准。截止 2024 年初,已有 10 家企业开发的下肢外骨骼机器人获得了 FDA 批准[9]。

在 1997 年,日本筑波大学 Cyberdyne 研究所率先推出了人体生物外骨骼动力服 HAL(见图 1),正式开启外骨骼机器人在康复领域的应用探索[10]。HAL 系统[11]整体质量约为 14 kg,采用三连杆双关节结构设计,配备可为髋、膝、肩、肘关节提供动力支持的电驱单元,并以电池供能。其关键技术在于结合表面肌电传感器与多种姿态、角度与生物力反馈装置,捕捉使用者大脑传导至肌肉的微弱生物电信号,预测运动意图并进行自主控制,实现柔顺式助力。系统设计理念强调与人体协同,追求“像身体自然延伸”的人机一体化体验。

以色列 Lifeward 公司研发的 ReWalk [12]系统是首个通过 FDA 认证的下肢外骨骼产品。其结构包括髋膝双关节电动机、主控单元、无线通信模块、压力感知系统及电池组件,总重约为 23 kg。ReWalk 可通过手腕控制器进行人机交互,当用户身体倾斜时,系统内置倾角传感器能快速识别重心变化,从而判断使用者意图并控制步态交替。

该公司还开发了柔性可穿戴系列 ReStore Exo-Suit [13](见图 2),以提高舒适性与适配性。该产品集成电源、电缆、腿部与鞋垫模块,支持辅助模式、支撑模式与无负载模式三种工作方式,执行器通过收缩鲍登线控制下肢运动,适用于步态训练与步态矫正。

美国 Ekso Bionics 公司则推出了 Ekso-Indego 和 Ekso 两款下肢外骨骼[14]。其中 Ekso-Indego 质量为 12 kg,采用髋膝双关节无刷直流电机驱动,并设有安全制动装置防止断电意外。其传感系统融合加速度计、角度编码器与陀螺仪等,可判断步态周期与重心分布,并切换适配的运动模式。Ekso 系列设备则配备 GaitCoach 智能康复模块,具备主动、预备、起始等四种步态模式,支持不同康复阶段的个性化训练[15]。

此外, SuitX 推出的 Phoenix 外骨骼结构简洁、易于穿戴。整机质量仅为 12.25 kg,可实现 4~8 小时续航,平均步速达 1.77 km/h,适合中低强度康复训练。

HONDA 开发的 HWA 髋部助行器[16]仅重 2 kg,利用实时扭矩反馈与角度传感,依据预设步态曲线进行髋关节辅助,适用于轻度功能障碍者的矫正训练。

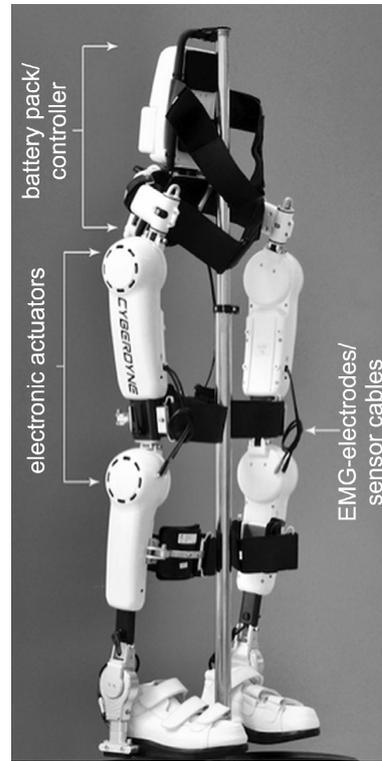


Figure 1. HAL [10]  
图 1. HAL [10]

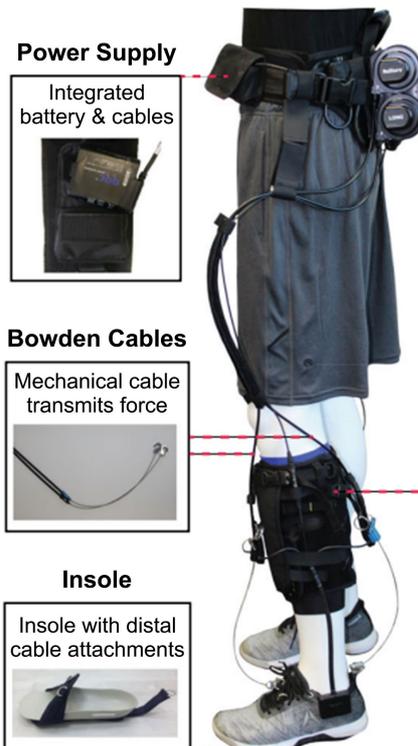


Figure 2. ReStore Exo-Suit [18]  
图 2. ReStore Exo-Suit [18]

新西兰 Rex Bionics 推出的 REX 系统[17]为唯一无需拐杖辅助的外骨骼产品, 质量达 38 kg, 结构复杂但稳定性高, 适用于高位截瘫与上肢功能严重受限人群。

加拿大 B-Temia 公司开发的 Keeogo 外骨骼采用“按需助力”控制策略, 装配于膝关节部位的执行器可根据实际步态需求动态输出助力, 更适合康复后期或轻症患者, 整体设备质量仅为 5.4 kg。

目前, 全球范围内如俄罗斯 ExoAtlet 的 ExoAtlet-II [19]、韩国三星的 GEMS-H [20]和法国 Wandercraft 的 Atalante 等外骨骼系统不断涌现, 推动了康复机器人产业的多样化发展。

(2) 国内对下肢外骨骼机器人的研究起步略晚, 但近年来在产品化与技术融合方面发展迅速。多家本土科技企业的设备已通过国家药品监督管理局(NMPA)认证, 具备临床使用资质。例如, 北京大艾机器人推出的 AiLegs 与 AiWalker [21]分别适用于康复中后期的地面步态训练与支撑式负重训练; 成都布法罗科技开发的 AIDER 系统[22] [23]具有 8 个自由度, 能够实现电动驱动下的精准神经训练; 丞辉威世科技的 ProWalk 和 PreWalk 分别支持立式与卧式训练, 适配不同康复阶段。

此外, 迈步机器人公司研发的 BEAR 和 MAX 外骨骼采用柔性执行器结构, 提升了穿戴舒适度与关节缓冲性能; 安杰莱科技推出的 LiteSteppe 引入镜像步态学习用于单侧偏瘫康复; 程天科技的童行 KidGo 针对儿童群体引入尺寸自适应与游戏化步态训练; 深圳作为科技公司开发的 ZW 智能助行系统还支持脑机接口、肌电信号与功能性电刺激的拓展接入。

整体来看, 国内外骨骼技术正朝着轻量化、智能化、场景多样化方向快速发展, 并逐步形成涵盖从床旁训练到社区康复的完整产品链。尽管在动力控制精度、使用便捷性与核心算法方面与国际领先产品尚存差距, 但其本土适配性强、临床覆盖面广, 为未来康复辅具国产化与普及化提供了坚实基础。

## 4. 下肢外骨骼辅具的理论基础及分类

### 4.1. 生物力学原理

正常步态周期中, 膝关节在站立相承受约 3 倍体重的载荷, 上下楼梯时可达体重的 4~6 倍[24]。行走障碍者常因肌力失衡、神经控制异常导致载荷分布不均, 如脑卒中患者膝过伸时内侧关节面压力可增加 50%, 加速软骨磨损[25]。外骨骼辅具的干预机制基于以下生物力学原理:

见图 3, 人体的基本轴线包括矢状轴、冠状轴(额状轴)和垂直轴, 依据这些轴线可以划分出三个相互垂直的基本平面, 即矢状面、冠状面(额状面)和水平面。

膝关节的运动涵盖了矢状面的屈伸运动, 绕垂直轴的旋转运动, 以及有限的内外翻运动。矢状面的屈伸是膝关节最主要的运动形式, 这一运动由股四头肌牵引, 同时前后交叉韧带相互制约而实现。膝关节由股骨和胫骨组成, 在三维空间中具有六个自由度, 包括三个平移自由度和三个旋转自由度。三个平移自由度分别对应于矢状轴方向的前后移动、冠状轴方向的左右平移以及垂直轴方向的压缩与分离。三个旋转自由度分别是矢状面的伸屈运动、水平面的内外旋转和冠状面的内外翻转。膝关节正常的伸屈角度因人而异, 从轻度过伸至较大屈曲范围均有差别; 内外旋转角度在完全伸直时几乎为零, 屈膝时内旋可达较大角度, 这与股骨髁的形态及不同屈曲角度下韧带和关节囊的紧张程度有关。

见图 4, 关于下肢对线, 股骨和胫骨的解剖轴线在膝关节中心相交形成向外的夹角, 称为胫股角, 平均约为正常范围。人体正常站立时, 股骨头、膝关节中心及踝关节中心应在同一条直线上, 这条线被称为下肢的力学轴线或机械轴, 也叫承重线。此时膝关节水平轴应与地面平行。但在病理情况下, 见图 5, 如膝内翻(O 型腿)或膝外翻(X 型腿), 胫股角发生变化, 下肢力学轴线偏向膝关节中心的某一侧。

膝关节的运动属于类铰链式多轴心三维运动, 其中矢状面上的伸屈幅度最大, 是股胫关节的主要运动。股骨髁在胫骨平台上的运动形式包括滚动和滑动两种。股骨髁在矢状面上的弧线长度大约是胫骨平台的两倍。屈曲初期的约 15°主要表现为滚动, 随着屈曲角度加大, 股骨开始向前滑动, 屈曲角越大, 滑

动越明显。由屈曲至伸展过程亦相似，先滑动，最后 30°左右以滚动为主。假设胫骨平台固定，膝关节伸展时股骨向后滑动并旋转，屈曲时则向前滑动。矢状面内前后滑动长度约为 10 毫米，冠状面左右滑动约 5 毫米，水平面上上下移动约 3 毫米。

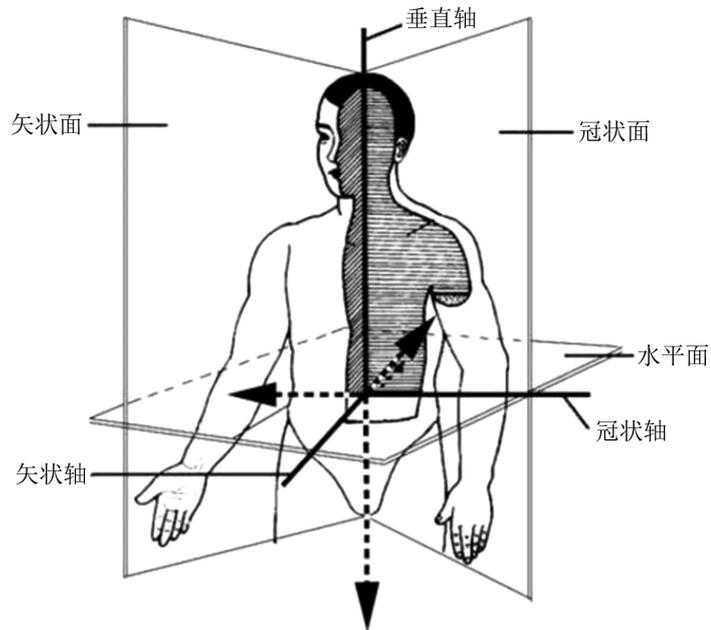


Figure 3. Axis and surface of body [24]

图 3. 人体的基本轴线与面[24]

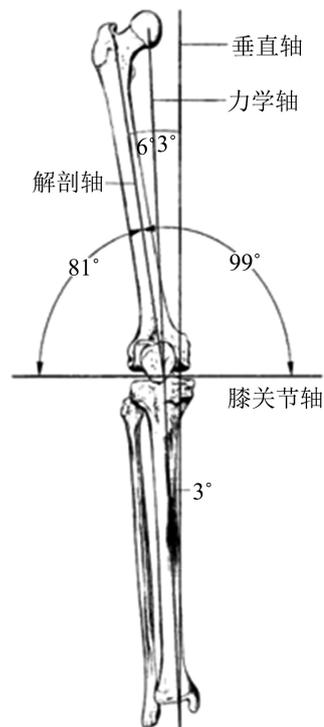
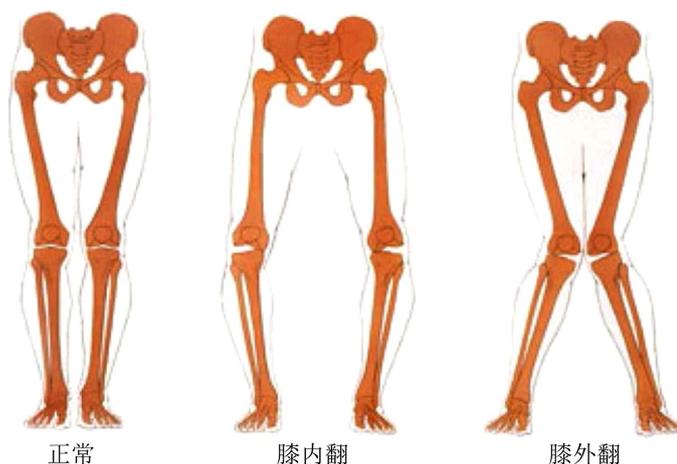


Figure 4. Force axis of normal lower limb [24]

图 4. 下肢力学轴线[24]



**Figure 5.** Comparison between normal knee and knee vargus, valgus [24]  
**图 5.** 正常膝关节与膝内翻、膝外翻对比[24]

“扣锁”机制[26]是指膝关节在伸直最后  $10^{\circ}$  至  $15^{\circ}$  范围内，股骨相对于胫骨会发生轻微的内旋，尤其最后  $5^{\circ}$  的旋转幅度最大，从而锁紧关节以保持稳定。这一机制与内侧胫股关节接触面积大于外侧、股骨内髁较外髁长、半月板形态及韧带张力密切相关。伸膝时，所有韧带均处于紧张状态，使股骨与胫骨产生挤压力，促使股骨髁像偏心轮一样旋转，同时半月板前角向前移动并撞击股骨，阻止膝关节过度屈曲。

## 4.2. 外骨骼辅具的分类与技术

### 4.2.1. 外骨骼辅具分类

下肢外骨骼的技术体系可视为传统矫形器在功能性与智能化方向上的系统性进化。传统矫形器本质上是一种静态结构强化装置，通过外部支撑实现关节的稳定性与限制性控制，广泛应用于关节固定、力线矫正及负重分担等场景。然而，随着康复需求向动态、主动、个体化方向发展，传统矫形器在响应能力、适配性和功能延展性方面逐渐暴露出不足。

为提升适应性与干预效率，传统矫形器逐步分化演进而为被动免荷外骨骼与主动免荷外骨骼两大技术分支。前者继承了传统结构的低能耗与稳定支撑优势，通过精密的机械结构(如弹性元件、杠杆系统与限位装置)重新分配关节负载，实现对下肢关节的免荷、对线和矫正，适用于静态支撑和早期康复阶段。后者则引入外部动力系统与智能控制模块，通过执行器驱动与多模态感知实现动力输出与人机交互，显著拓展了在主动步态训练与复杂运动功能重建中的适用边界。

### 4.2.2. 被动免荷外骨骼

被动免荷外骨骼不依赖任何外部动力系统(如电机、液压或气动)，而是通过精巧的机械结构设计——包括弹性支撑、杠杆机制、阻尼与限位装置等——巧妙地重新分配或引导身体负载，实现对下肢关节(如膝关节、髋关节等)的支撑与稳定，从而减轻肌肉负担、改善异常步态。其主要依靠杠杆、弹簧、铰链等构件实现零能耗的支撑功能，通常重量较轻，一般在 2 公斤以内，适用于静态支撑和轻度步态训练，具有低成本、低维护的优势，常见价格在几千元至一万元之间。典型产品包括铰链型膝矫形器——瑞典式膝笼(Swedish knee cage)，通过硬性夹板限制膝关节在  $0^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$  屈曲范围内，适用于脑卒中后膝过伸患者，临床数据显示其可使过伸角度由  $25^{\circ}$  降至  $8^{\circ}$  以下[1]。此外，王雪涛研发的 3D 打印钛合金多孔结构踝足矫形器，借鉴动物骨骼蜂窝状设计，重量仅 280 克，抗压强度高达 60 MPa，可优化足底压力分布，减少前足载荷 30% [5]。

### 4.2.3. 主动免荷外骨骼

主动免荷外骨骼依托外部动力源(如电动机、人工肌肉等)和智能控制系统,能够主动为下肢关节输出动力或提供力矩补偿,广泛应用于运动辅助、站立支撑及步态引导等功能性康复场景。例如,Ekso Bionics 外骨骼采用无刷直流电机,在站立相阶段可施加高达 18 N·m 的伸膝力矩,结合步态规划算法,帮助截瘫患者实现最高 0.6 m/s 的步行速度[2]。此外,柔性驱动技术在该领域的应用也逐渐成熟,如何育民研发的被动变刚度外骨骼,通过气动肌肉模拟腓肠肌的弹性特性,在摆动相储存弹性能量、站立相释放辅助抬腿,可有效降低步行能耗达 20% [27]。

在动力系统、结构设计、控制策略和应用范围等方面,主动免荷外骨骼与被动免荷外骨骼存在显著差异。主动系统依赖电机、液压或气动等驱动装置,具备主动输出助力的能力,适用于动态行走、复杂步态矫正和高强度康复训练。但相应地,其整机重量一般为 5~10 kg,需要配备电源(多为锂电池)支持,续航时间通常为 4~8 小时,设备成本较高,多在数万元至十万元之间。

在执行器配置方面,主动外骨骼采用伺服电机、液压缸等可控驱动装置,而被动外骨骼则多由机械铰链与弹性元件组成。传感器层面,主动外骨骼通常集成多种感测元件,如足底压力传感器用于监测负重变化,惯性测量单元(IMU)用于检测姿态与关节角度,肌电传感器(EMG)则捕捉使用者神经信号,为实时精准控制提供数据支持。其控制系统常由单片机或嵌入式工控系统构成,负责对传感器数据的实时处理与驱动输出控制,而这些配置在被动外骨骼中则不具备或需求极低。

主动免荷外骨骼凭借其“智能助力”的特点,在功能恢复需求更高、动态训练更复杂的康复场景中展现出独特优势;而被动免荷外骨骼则以其轻便、低成本、免维护等特点,广泛服务于基础支撑与早期康复阶段。

### 4.2.4. 被动免荷与主动免荷外骨骼比较分析

在下肢外骨骼技术中,被动免荷和主动免荷外骨骼各自具有不同的优缺点、适用场景及康复效果。

被动免荷外骨骼主要通过分配或引导身体负载,减少肌肉负担,适用于静态支撑和基础康复训练。其优点是成本低、结构简单,重量较轻,适用于早期康复阶段和轻度步态障碍患者。

主动免荷外骨骼则通过外部动力系统为患者提供力矩补偿,适合需要更高动态控制的患者。其主要优点是可以辅助复杂步态训练、动态负荷调节等,广泛应用于中重度神经损伤患者的康复。其缺点是设备较重,成本较高,且能源消耗较大,续航时间有限。

综上所述,主动免荷外骨骼在康复效果上优于被动系统,尤其适用于需要精细步态调整和高强度训练的患者。然而,被动免荷外骨骼则在初期康复、低强度训练中具有较好的性价比。两者的互补性为不同阶段的患者提供了个性化的康复方案。结合目前的技术发展,未来可以在被动外骨骼中引入智能控制模块,实现一定程度的自适应调整,而在主动外骨骼中进一步优化能源管理系统,以提升设备的舒适性和使用便捷性。

## 5. 行走障碍人群的康复应用场景

### 5.1. 脑卒中偏瘫患者

脑卒中偏瘫患者常表现为患侧肌力显著下降、步态对称性失衡,约 50% 的患者伴随膝过伸或足下垂等典型功能障碍。下肢外骨骼辅具的干预核心在于:通过机械限位或动力辅助实现对称步态训练,诱导神经可塑性重塑;同时通过结构设计分散患侧关节载荷,减轻功能代偿。临床研究表明,主动外骨骼训练可使患者步行速度提升 20%~30%,患侧股四头肌肌电(EMG)活性增强 15%~25% [28]。如 HAL 系统通过实时捕捉肌电信号识别运动意图,驱动动力单元辅助完成屈伸动作,患者经 6 周训练后步行效率提升

显著，且步态周期中支撑相时间占比更接近生理状态[1]。铰链型膝矫形器则通过限制膝关节过伸角度至5°以内，配合3D打印踝足矫形器纠正足下垂，可使患者站立中期胫股关节接触力降低18% [24]。

在脑卒中偏瘫患者的康复中，主动免荷外骨骼较为适用，尤其是在康复后期，需要进行步态训练和高强度的康复训练时。而对于早期康复阶段，尤其是针对膝关节过伸的患者，被动免荷外骨骼更具性价比和实用性。

## 5.2. 脊髓损伤患者

对于不完全性脊髓损伤患者，主动外骨骼如 ReWalk 系统可辅助恢复站立-行走功能链；完全性损伤患者则通过外骨骼实现体位转换，降低长期卧床导致的压疮风险。研究显示，脊髓损伤患者使用 ReWalk 训练6个月后，80%可独立完成室内行走，能耗较初始阶段降低40% [2]。但临床应用中仍存在显著挑战：高位脊髓损伤患者需依赖躯干控制能力完成穿戴，而传统刚性外骨骼(如 Ekso Bionics)重量达5~10 kg，可能加剧上肢代偿负荷[27]。被动免荷矫形器如整体免荷型膝踝足矫形器(KAFO)虽可通过机械锁止维持关节稳定，但缺乏动态助力能力，难以适应复杂地形行走需求[29]。

对于脊髓损伤患者，尤其是完全性脊髓损伤患者，主动免荷外骨骼的优势更加明显，因为其提供了较强的动力支持和步态引导功能。然而，在康复的初期，尤其是对于那些步态偏差不严重的患者，轻便的被动免荷外骨骼设备仍然可以发挥作用。

## 5.3. 脑瘫与儿童康复

脑瘫儿童因肌张力异常、运动控制模式未成熟，对外骨骼辅具的轻量化与安全性要求严苛。如 WalkBot 儿童康复机器人采用柔性硅胶衬垫包裹下肢，通过被动铰链限制异常关节活动，3个月干预可使患儿步长增加10%~15%，足内翻角度改善8°~12° [3]。3D打印技术制备的仿生踝足矫形器，模仿鸟类骨骼多孔结构，重量仅280 g，可通过拓扑优化分散足底压力30%，减少前足异常负荷[5]。但需注意个体差异：约30%的痉挛型脑瘫患儿可能因触觉敏感抗拒穿戴，需结合PNF技术等神经肌肉本体感觉促进方法提升适应性[30]。

对于脑瘫儿童，尤其是在康复初期，轻便的被动免荷外骨骼可以提供较好的支持，避免了过度依赖动力设备。

## 6. 未来发展方向

### 6.1. 技术融合

#### 6.1.1. 双向演化

随着康复工程不断发展，下肢外骨骼辅具正在呈现出“两条路径并进”的演化趋势：一方面，传统的被动免荷外骨骼朝着“智能化”和“感知化”方向升级；另一方面，主动免荷外骨骼则致力于向“轻量化”与“低能耗”方向持续优化。

被动免荷外骨骼本质上依靠结构本身对下肢负载进行重新分配，起初多用于提供静态支撑。近年来，智能传感与材料工艺的迅速发展，使该类设备逐渐具备了动态感知与实时响应能力，推动其实现“机械构型+信息感知”的融合。以瑞典研发的 Swedish knee cage 为例，该系统在硬质支架中内置微型压力传感器(误差范围 $\pm 0.5$  N)，可实时监测膝关节内侧的载荷变化，并在检测值超过使用者体重1.5倍时发出警报，提示用户调整行走姿态，以防应力积累造成损伤[6]。另有赵春霞设计的整体免荷型膝关节矫形器，在铰链结构中集成磁流变阻尼器，配合惯性测量单元(IMU)获取的角速度信号，当膝关节屈曲速度超过30°/s时，阻尼力自动增强50%，有效避免高强度屈曲造成的结构性冲击[29]。

在结构与材料层面,被动系统也正融合仿生设计与个性化制造技术,以增强使用者舒适性与适配性。裴婉珠通过 3D 打印技术构建出一种模仿鹿角多孔结构的轻质下肢矫形器,孔隙率高达 60%,重量仅 280 g,具备与天然骨相媲美的抗压性能。其结构经过拓扑优化设计后,足底压力分布均匀性提升达 35%,可实现高度个性化定制[31]。部分系统还集成了 IMU 和压力传感器,能够通过蓝牙实时上传关节载荷和姿态数据至康复平台,医生可据此远程调整支撑参数,从而提高患者依从性,据报道依从性可提升 60%以上[6]。

相比之下,主动免荷外骨骼以其动力辅助能力见长,近年来也开始聚焦于设备小型化与能源效率提升,以应对传统设备“重、耗、电”的三重挑战。例如,清华大学团队研发的一款柔性外骨骼系统采用形状记忆合金弹簧取代传统电机作为致动源,整机质量控制在 3.2 kg 以内。该系统可在摆动相阶段储存约 10J 弹性势能,于站立相释放用于抬腿辅助,其整体能耗较传统电机系统降低 30% [32]。同时,何育民团队基于气动肌肉设计的驱动方案,可模拟腓肠肌的弹性响应特性,实现能量的周期性释放和回收,使设备单位步行能耗降低约 20%,并维持整体重量 3.2 kg 以内[27]。

在能量管理方面,主动外骨骼同样取得了显著进展。例如,何育民在其设计中引入压电陶瓷能量回收模块,能在膝关节屈伸过程中产生 3V 电压,有效延长设备续航至 6 小时以上。另一例清华大学团队开发的外骨骼装置则在行走 1 公里的过程中,可通过压电组件回收约 200 mAh 电能,并结合锂电池实现能量闭环管理,将总重控制在 3.5 kg 以内[32]。

综上所述,当前下肢外骨骼系统正通过“被动智能化”和“主动轻量化”的双向技术演化路径,解决传统结构刚性与动力冗余的痛点,为实现康复训练的精细化控制与场景化延展提供了坚实的技术基础。

### 6.1.2. 技术交叉

近年来,多模态智能技术的引入正推动下肢外骨骼从单一力学助力向神经肌电-智能交互的深度融合发展。其中,脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)技术为运动意图识别提供了新的解决方案。孙国安等提出的一种基于一维卷积神经网络(1D-CNN)与支持向量机(SVM)相结合的肌电信号预测模型,能够实现脊髓损伤患者运动意图的快速识别,使主动外骨骼系统的响应延迟缩短至 50 毫秒以内,较传统肌电控制模式在响应速度方面提升约 40% [33]。BCI 技术进一步可利用脑电(EEG)信号直接转换为控制指令,适用于完全性截瘫患者的极限状态控制。如 ReWalk 系统集成脑电信号识别模块后,可识别站立意图,其识别成功率达 85%,显著增强了严重障碍患者的主动控制能力[2]。

与此同时,功能性电刺激(Functional Electrical Stimulation, FES)技术作为一种有效的神经-肌肉激活手段,在外骨骼系统中展现出良好的协同效果。武德的实验研究表明,在下肢外骨骼中引入 FES 干预可显著增强卒中患者步行过程中的膝关节伸展力矩(提升幅度为 22%),同时下肢肌群的肌电活动水平亦增加约 30%,表明神经肌肉协同参与度明显提高。实际应用中,Ekso Bionics 外骨骼系统已实现与 FES 联合控制,通过刺激腓肠肌以辅助足背屈动作,从而有效矫正高达 80%的足下垂型异常步态[32]。

此外,人工智能在步态感知与预测控制中的应用也日益深入。李亚宁基于长短时记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)构建了步态轨迹预测模型,其在多地形环境(如斜坡、楼梯)下可将下肢运动轨迹预测误差控制在  $\pm 3^\circ$  范围内,支持复杂情境下的自适应助力调节,有望提升外骨骼系统对现实场景的适应能力与训练精准度[34]。

## 6.2. 应用场景拓展

### 6.2.1. 从临床到居家康复的延伸

随着下肢外骨骼技术的逐步成熟,其应用场景正由传统的医疗机构逐步向家庭与社区延伸,便携化

设计在这一进程中发挥了关键推动作用。一方面,轻量化与折叠式结构的引入显著提升了设备的可穿戴性和操作便捷性。例如,傅利叶智能公司推出的“睿行”系列外骨骼采用模块化可折叠设计,总重控制在 4.5 kg 以内,收纳体积仅为 0.05 m<sup>3</sup>,支持用户自主穿戴与操作,实现在家中完成常规训练任务的可行性。据报道,该系统使居家康复的覆盖率提高了约 70% [31]。

另一方面,借助物联网与云平台等技术手段,外骨骼辅具逐步融入基层康复服务体系,实现了社区康复资源的联动整合。李保坤开发的一款可穿戴式下肢外骨骼系统集成 GPS 与步态数据采集模块,可将患者的位置信息与行走数据实时上传至社区康复云平台,实现医生远程干预与康复计划动态调整。试验数据显示,该系统可将社区医生的康复指导响应效率提升近 50%,在康复连续性与个体差异适配方面展现出较大优势[35]。

### 6.2.2. 特殊人群精准适配

在老龄化社会背景下,与年龄相关的运动功能衰退和神经退行性疾病显著增加,针对该类人群研发专用外骨骼辅具成为当前康复技术的重要方向之一。以老年人群常见的跌倒风险为例,杨巍团队设计了一种基于惯性测量单元(IMU)的髋关节外骨骼,其系统可实时监测穿戴者的身体倾角,当检测到前倾角度超过 15°时,内置气动驱动装置可在 0.1 秒内响应并输出约 80 N 的反向支撑力,从而有效辅助维持身体稳定。实验结果表明,该系统可将老年人跌倒风险降低约 65% [36],在预防性康复设备领域展现出良好的应用前景。

此外,针对神经系统疾病引发的震颤障碍,如帕金森病等,也有研究提出针对性抑制方案。黄群等基于 Kano 模型开发了一款柔性手部外骨骼装置,通过高精度传感器识别手部震颤频率(1~5 Hz 区间),结合反向力反馈机制对震颤进行物理抵消控制。实验表明,该装置在不影响使用者主动运动功能的前提下,可有效抑制震颤幅度约 40%,为震颤障碍患者提供了一种可穿戴、非药物化的辅助干预方式[31]。

## 7. 总结

下肢外骨骼作为新兴康复辅具,在行走障碍人群中的应用正呈现出“被动智能化”与“主动轻量化”的双向发展趋势。未来外骨骼的关键在于:增强人机耦合的自然性;推动家庭化、社区化康复的普及;满足特殊人去精准适配需求。实现从“辅助训练”到“功能重建”的跨越。

## 致 谢

本论文的顺利完成,离不开导师的悉心指导与深切关怀。在论文的选题、构思及撰写过程中,导师始终给予我耐心指导与宝贵建议,为本研究的推进倾注了大量心血,在此谨致以最诚挚的敬意和感谢。同时,我也要感谢在论文写作过程中给予我帮助与支持的同伴们,正是他们的协作与鼓励,使我能够顺利完成本论文的撰写工作。对此,我深感欣慰并衷心致谢。

## 参考文献

- [1] 杨芸. 脑卒中后膝过伸患者的膝矫形器选择与疗效探讨[J]. 人人健康, 2017(14): 289.
- [2] 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.
- [3] 周璇, 盛传新, 何诗婷. 儿童下肢康复外骨骼机器人设计[J]. 包装工程, 2025, 46(6): 519.
- [4] 蔡可书, 侯红, 吴玉霞, 等. 膝控制矫形器治疗老年重症卒中偏瘫患者康复疗效观察[J]. 实用老年医学, 2014, 28(12): 996-998.
- [5] 王雪涛, 王超群, 范博皓, 等. 下肢康复矫形器的研制与应用[J]. 临床医药文献电子杂志, 2017, 4(15): 2818-2819.
- [6] 杨芸. 铰链型膝矫形器对脑卒中患者步态稳定疗效[J]. 人人健康, 2017(16): 34.

- [7] 张济川, 金德闻. 中外辅助技术的发展状况比较[J]. 中国康复理论与实践, 2007(4): 324-326.
- [8] 朱茜, 陈伟. 现代矫形器在临床中的应用与发展[C]//中国康复医学会运动疗法专业委员会. 第六次全国运动疗法学术会议论文集. 2002: 231-233.
- [9] 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.
- [10] Aach, M., Schildhauer, T.A., Zierjacks, A., Jansen, O., Weßling, M., Brinkemper, A., *et al.* (2023) Feasibility, Safety, and Functional Outcomes Using the Neurological Controlled Hybrid Assistive Limb Exoskeleton (HAL) Following Acute Incomplete and Complete Spinal Cord Injury—Results of 50 Patients. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, **46**, 574-581. <https://doi.org/10.1080/10790268.2023.2200362>
- [11] Sczesny-Kaiser, M., Höffken, O., Aach, M., Cruciger, O., Grasmücke, D., Meindl, R., *et al.* (2015) HAL Exoskeleton Training Improves Walking Parameters and Normalizes Cortical Excitability in Primary Somatosensory Cortex in Spinal Cord Injury Patients. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **12**, Article No. 68. <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0058-9>
- [12] Esquenazi, A., Talaty, M., Packel, A. and Saulino, M. (2012) The Rewalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **91**, 911-921. <https://doi.org/10.1097/phm.0b013e318269d9a3>
- [13] Awad, L.N., Esquenazi, A., Francisco, G.E., Nolan, K.J. and Jayaraman, A. (2020) The Rewalk Restore™ Soft Robotic Exosuit: A Multi-Site Clinical Trial of the Safety, Reliability, and Feasibility of Exosuit-Augmented Post-Stroke Gait Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 80. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00702-5>
- [14] Hartigan, C., Kandilakis, C., Dalley, S., Clausen, M., Wilson, E., Morrison, S., *et al.* (2015) Mobility Outcomes Following Five Training Sessions with a Powered Exoskeleton. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation*, **21**, 93-99. <https://doi.org/10.1310/sci2102-93>
- [15] Molteni, F., Gasperini, G., Gaffuri, M., Colombo, M., Giovanzana, C., Lorenzon, C., *et al.* (2017) Wearable Robotic Exoskeleton for Overground Gait Training in Sub-Acute and Chronic Hemiparetic Stroke Patients: Preliminary Results. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, **53**, 676-684. <https://doi.org/10.23736/s1973-9087.17.04591-9>
- [16] Koseki, K., Yozu, A., Takano, H., Abe, A., Yoshikawa, K., Maezawa, T., *et al.* (2020) Gait Training Using the Honda Walking Assist Device® for Individuals with Transfemoral Amputation: A Report of Two Cases. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, **33**, 339-344. <https://doi.org/10.3233/bmr-191726>
- [17] Birch, N., Graham, J., Priestley, T., Heywood, C., Sakel, M., Gall, A., *et al.* (2017) Results of the First Interim Analysis of the RAPPER II Trial in Patients with Spinal Cord Injury: Ambulation and Functional Exercise Programs in the REX Powered Walking Aid. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **14**, Article No. 60. <https://doi.org/10.1186/s12984-017-0274-6>
- [18] Awad, L.N., Lewek, M.D., Kesar, T.M., Franz, J.R. and Bowden, M.G. (2020) These Legs Were Made for Propulsion: Advancing the Diagnosis and Treatment of Post-Stroke Propulsion Deficits. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 139. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00747-6>
- [19] Pais-Vieira, C., Allahdad, M., Neves-Amado, J., Perrotta, A., Morya, E., Muioli, R., *et al.* (2020) Method for Positioning and Rehabilitation Training with the Exoatlet® Powered Exoskeleton. *MethodsX*, **7**, Article 100849. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100849>
- [20] Lee, S.H., Lee, H.J., Shim, Y., *et al.* (2020) Wearable Hip-Assist Robot Modulates Cortical Activation during Gait in Stroke Patients: A Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 145. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00777-0>
- [21] Chen, S., Wang, Z., Li, Y., Tang, J., Wang, X., Huang, L., *et al.* (2022) Safety and Feasibility of a Novel Exoskeleton for Locomotor Rehabilitation of Subjects with Spinal Cord Injury: A Prospective, Multi-Center, and Cross-Over Clinical Trial. *Frontiers in NeuroRobotics*, **16**, Article 848443. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.848443>
- [22] Bai, X., Gou, X., Wang, W., Dong, C., Que, F., Ling, Z., *et al.* (2019) Effect of Lower Extremity Exoskeleton Robot Improving Walking Function and Activity in Patients with Complete Spinal Cord Injury. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, **19**, Article 1940060. <https://doi.org/10.1142/s0219519419400608>
- [23] Wang, Y., Qiu, J., Cheng, H. and Zheng, X. (2020) Analysis of Human-Exoskeleton System Interaction for Ergonomic Design. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, **65**, 909-922. <https://doi.org/10.1177/0018720820913789>
- [24] 徐明峰. 整体免荷型膝关节矫形器设计[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [25] 李阳, 宋毓, 姜淑云, 等. 三维步态分析技术在矫形器领域的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(7): 874-877.
- [26] 汤荣光, 藏尅戎. 膝关节的基本生物力学概念[J]. 国外医学.创伤与外科基本问题分册, 1981(4): 205-210.

- [27] 何育民, 严伟奇, 罗丹. 被动变刚度下肢外骨骼的设计与仿真[J]. 制造业自动化, 2025, 47(3): 17-24.
- [28] 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.
- [29] 赵春霞. 整体式膝关节免荷矫形器的设计与性能评价[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [30] 陈白云, 尚清, 张会春, 等. 选择性脊柱推拿联合下肢外骨骼机器人步行训练在痉挛型脑性瘫痪患儿中的应用效果[J]. 中国临床医生杂志, 2025, 53(05): 641-645.
- [31] 裴婉珠. 基于仿生设计学的 3D 打印下肢矫形器设计研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [32] 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.
- [33] 孙国安, 赵明, 张廷丰, 等. 基于肌电预测模型的下肢外骨骼自适应控制方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(3): 34-41.
- [34] 李亚宁, 黄国威, 谢龙汉, 基于深度学习的下肢康复外骨骼步态轨迹预测[J]. 机器人技术与应用, 2024(4): 28-32.
- [35] 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.
- [36] 杨巍, 方炯杰, 颜泽皓, 等. 髋关节外骨骼导纳参数对偏瘫步态康复的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(6): 640-650.