

柔性外骨骼技术在步态矫正领域的研究进展

孙振坤^{1,2}, 孟巧玲^{1,2*}

¹上海理工大学康复工程与技术研究所, 上海

²上海康复器械工程技术研究中心, 上海

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘要

随着人口老龄化程度的加深以及神经系统疾病发病率的上升, 步态异常已经成为影响人们生活质量和自理能力的重要问题。步态矫正的目标是帮助患者提高步态或恢复正常步态、增强行动能力。近年来, 作为一种新型可穿戴辅助设备, 柔性外骨骼凭借其舒适性、智能化的特点在步态矫正领域展现出巨大的发展潜力。本研究首先介绍了以结构设计、驱动控制系统和适应性设计为重点的柔性外骨骼设计原理。随后对步态矫正领域柔性外骨骼的最新研究进展进行了深入探讨。此外, 文章还分析了适应性、控制准确性、安全耐用性、经济成本等柔性外骨骼技术在实际应用中面临的挑战。最后总结并展望了步态矫正领域中柔性外骨骼技术在未来的发展方向, 通过材料优化、智能控制系统进步、能量供给等创新手段, 进一步促进其在步态矫正中的应用。

关键词

康复外骨骼, 柔性外骨骼, 步态矫正

Research Progress of Flexible Exoskeleton Technology in the Field of Gait Correction

Zhenkun Sun^{1,2}, Qiaoling Meng^{1,2*}

¹Institute of Rehabilitation Engineering and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Engineering Research Center of Assistive Devices, Shanghai

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

With the deepening of the population aging and the increasing incidence of nervous system diseases,

*通讯作者。

abnormal gait has become an important problem affecting people's self-care ability and quality of life. The goal of gait correction is to help patients improve their gait or restore normal gait and enhance mobility. In recent years, as a new type of wearable auxiliary equipment, the flexible exoskeleton has shown great development potential in the field of gait correction by virtue of its comfortable and intelligent characteristics. In this study, the design principle of flexible exoskeleton is introduced, which focuses on structural design, drive control systems, and adaptive design. Then, the latest research progress of flexible exoskeletons in the field of gait correction is deeply discussed. In addition, this paper also analyzes the challenges faced by flexible exoskeleton technology in practical applications, such as adaptability, accuracy of control, safety and durability, and economic cost. Finally, the future development direction of flexible exoskeleton technology in the field of gait correction is summarized and projected. Material optimization, intelligent control system improvement, energy supply, and other innovative means further promote its application in gait correction.

Keywords

Rehabilitation Exoskeleton, Flexible Exoskeleton, Gait Correction

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

步态是人类运动的重要形式，正常的步态是人类高效、安全行走的基础[1] [2]。随着人口老龄化的加剧以及神经系统疾病发病率的升高，越来越多的人出现步态异常现象，如偏瘫步态、帕金森步态等[3]。步态问题严重限制了个体的自理能力和生活质量。步态矫正的主要目标是帮助患者恢复或改善正常步态，从而提升其行动能力、独立性和生活质量。通过有效的步态矫正，可以减轻患者的运动障碍，减少摔倒的风险，并有助于提高生活的自主性。在康复医学中，康复治疗师会通过一系列的物理治疗、功能训练、康复设备等手段来帮助患者恢复和改善功能，常见的方法包括物理治疗(如平衡训练、力量训练、步态训练等)和使用矫形器具来改善患者的步态。随着科技的进步，尤其是可穿戴设备、智能外骨骼、机器人辅助治疗等技术的出现，步态矫正手段得到了极大的创新，这些技术可以为患者提供更精确、更个性化的治疗，改善传统康复疗法耗时耗力的局限性[4]。柔性外骨骼技术作为一种新型的穿戴式机器人技术，旨在通过柔性材料和智能控制系统增强人体功能[5]。这种技术的核心特征在于其柔软性和适应性，相较于传统硬质外骨骼，柔性外骨骼具有更高的舒适性、灵活性和动态调节能力。柔性外骨骼通常由软材料(如弹性纤维、智能材料等)组成，可以根据需要调整形态、力的分布和支持区域，帮助穿戴者提高运动效率、减轻疲劳，甚至增强肌肉力量。柔性外骨骼的应用领域广泛，涵盖了工业、军事、医疗等多个领域[6]。医疗领域中，柔性外骨骼作为一种先进的辅助设备，在步态辅助和矫正方面有着巨大的潜力。它能够根据用户的步态实时调整提供的支持力，使得患者的步态更加自然和流畅，尤其是对中风、帕金森、脊髓损伤等导致步态异常的患者。

因此，本文对当前柔性外骨骼技术进行分析，并讨论其在步态矫正领域的最新研究进展，总结柔性外骨骼在步态矫正领域的创新点与挑战，并展望未来的发展方向。

2. 柔性外骨骼技术及其在步态矫正领域的研究

2.1. 柔性外骨骼技术概述

柔性外骨骼是一种能够与人体运动相协调，并在身体外部提供额外支持和力量的可穿戴设备。与传

统的刚性外骨骼相比，柔性外骨骼使用了柔性材料和智能结构，它主要采用轻质、柔韧性好的材料，在增强稳定性的同时不影响穿戴者的自然运动，这些材料能够保证活动中外骨骼紧密贴合人体，适应使用者的自然运动。其在设计和使用上具有更高的适应性和舒适性，它们不仅能协助身体移动，还能够在特定的动作中提供必要的支持，尤其在步态矫正、康复治疗和辅助行动方面具有重要应用。

柔性外骨骼的设计通常围绕着适应性、灵活性和舒适性展开，目的是提供一种能有效辅助步态矫正的设备。其设计不仅需要传统外骨骼所具有的动力支持与运动辅助手段，同时还要考虑到使用者的舒适性、自然步态的恢复和设备的柔性操作。柔性外骨骼通常采用模块化设计，将外骨骼设计成不同的单元，根据矫正需求的不同进行相应的调整。模块化设计有助于优化外骨骼重量分配，提升佩戴舒适度[7]，其结构、驱动控制系统、适应性设计是柔性外骨骼设计的三个关键要素[8]。

2.2. 柔性外骨骼工作原理

柔性外骨骼通过智能传感器、执行器和控制系统的协作，模拟和增强穿戴者的自然运动。其工作原理通常包括以下几个关键部分：传感器系统、执行器系统、驱动控制系统。

2.2.1. 柔性外骨骼传感器和执行器

柔性外骨骼通过安装在不同部位的传感器(如加速度计、陀螺仪和力传感器等)实时监测穿戴者的运动状态[9]。传感器可以捕捉到步态、肌肉活动、关节角度和身体姿势等信息。

执行器通常由电机、气动肌肉或柔性材料组成。它们根据传感器反馈的运动数据，适时地提供必要的支持力或推动力，帮助穿戴者进行步态矫正或行动支持。

2.2.2. 柔性外骨骼驱动控制系统

柔性外骨骼的驱动控制系统是实现精确步态矫正的核心，柔性外骨骼的驱动方式主要包括绳索驱动、智能材料驱动等[10]。基于鲍登线的绳驱系统因其高功率密度和柔顺性成为主流方案。典型的绳索驱动柔性外骨骼工作原理可概括如下：柔性外骨骼框架通过“锚点”或负载路径和电机有效连接，以优化人机交互并提升佩戴舒适性；电机通过传动机制拉伸绳索，从而提高驱动助力的效率；控制器模拟肌肉运动并施加机械力，以驱动下肢关节的运动。在此过程中，锚点、负载路径、缆索传动机制以及控制策略是实现外骨骼柔顺驱动的关键因素。有研究表明，人体承载的重量会显著增加佩戴者的代谢负担，而腰带的承重则几乎没有显著影响。因此，大多数缆索驱动的柔性外骨骼将驱动控制系统放置在背包或腰带上，以尽可能减轻增加的重量对佩戴者代谢负担的影响。

哈佛大学的研究团队最早开启了绳索驱动技术的研究。在 2013 年，哈佛大学开发了一款名为 Soft Exosuit a1 的外骨骼[11]，如图 1(a)所示。该原型样机总重 10.1 公斤，通过传动机制，在踝关节和髋关节可以产生的辅助扭矩幅度分别为身体行走时自然产生扭矩的 18% 和 30%。到 2015 年，该团队通过模拟人体韧带和肌腱的结构与功能对外骨骼进行优化，优化后的 a1 外骨骼通过电机控制鲍登电缆线的收缩和拉伸，可以产生最大为 200 N 的力[12]。受到哈佛大学柔性绳驱外骨骼的启发，苏黎世大学的研究团队研究了一款用于辅助髋关节、膝关节和踝关节的柔性外骨骼[13]，如图 1(b)所示。该外骨骼利用了动力学耦合关节中扭矩和功率的协同效应，能够仅用一个电机驱动一条腿的多个关节生成辅助扭矩。2018 年，北亚利桑那大学的勒纳团队开发了一种自适应踝关节外骨骼[14]，如图 1(c)所示。该绳驱外骨骼系统在踝关节设置了足底压力传感器和扭矩传感器，用于检测踝关节的辅助扭矩。与不穿戴设备相比，该外骨骼可以降低人体 16% 的能量代谢。2019 年，该团队通过提出基于关节扭矩的比例控制器改进了控制策略，比例控制器使用踝关节估计的瞬时扭矩作为功率函数的变量，其代谢值可降低 17% 到 27% [15]。武汉工程大学研究团队提出的一种耦合滑轮运动学的扩展运动学模型，采用绳驱并联机器人末端执行器的高精度运

行需要精确的运动学模型提供指导[16], 但需解决缆绳松弛等问题, 部分研究采用被动补偿关节轴线偏差设计。

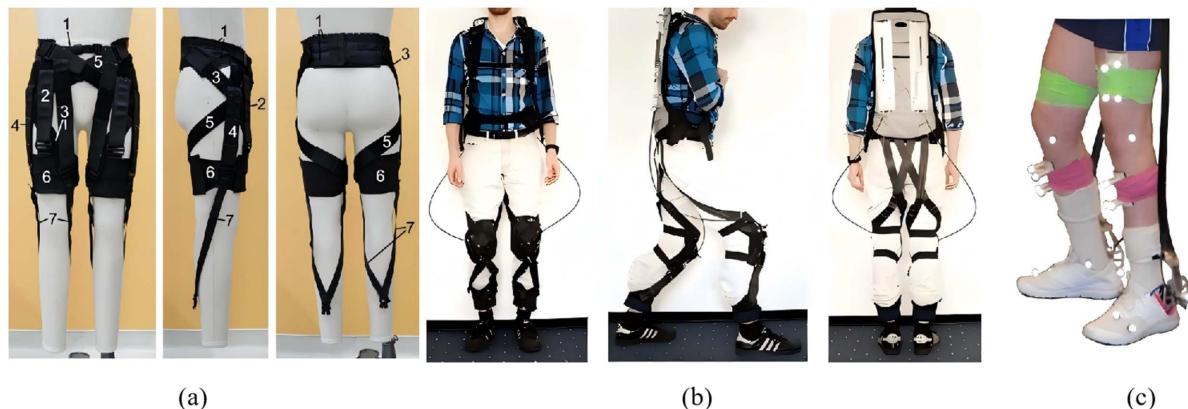


Figure 1. Rod-driven exoskeleton: (a) Harvard University Soft Exosuit a1 exoskeleton; (b) University of Zurich flexible exoskeleton

图 1. 绳驱外骨骼: (a) 哈佛大学 Soft Exosuit a1 外骨骼; (b) 苏黎世大学柔性外骨骼; (c) 柔性踝关节外骨骼

智能材料的驱动技术包括形状记忆合金、气动人工肌肉等。形状记忆合金(SMA)作为一种温度敏感型智能材料, 引起了人们的极大关注。与传统的电机驱动、气动驱动和液压驱动相比, SMA 驱动具有驱动简单、重量轻、功率重量比高、无噪音、形状记忆效应、超弹性和独特的自感知等特点, 在航空、医疗和机器人领域得到广泛应用。然而, 非线性、多映射迟滞和时变等动态特性影响了 SMA 输出力的控制精度和系统的跟踪性能, 限制了其发展。

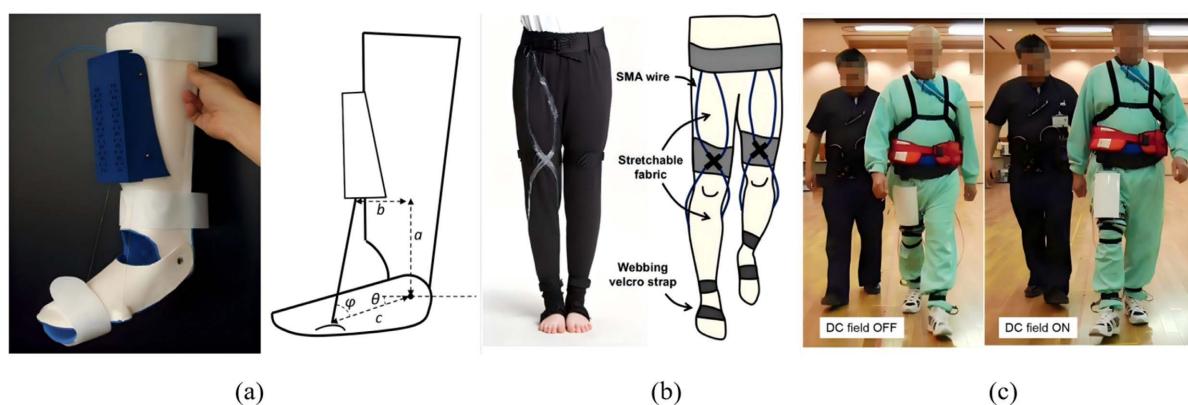


Figure 2. Smart material exoskeleton: (a)Shape memory alloy ankle exoskeleton; (b) Shape memory alloy exoskeleton suit; (c) PVC exoskeleton

图 2. 智能材料外骨骼: (a) 形状记忆合金踝关节外骨骼; (b) 形状记忆合金外骨骼服装; (c) 聚氯乙烯 PVC 外骨骼

2012 年, 意大利国家研究委员会团队提出了一种形状记忆合金驱动的踝关节外骨骼, 以防止行走时足下垂症状的发生[17], 如图 2(a)所示。该系统利用胫前肌的肌电信号作为控制信号源, 驱动由两种镍钛合金组成的执行器。已验证该外骨骼能够实现 36°背屈和 1.8 Nm 的助力。Kim 等人设计了一种基于形状记忆合金的智能服装用来辅助踝关节[18]。如图 2(b)所示, 该团队将形状记忆合金嵌入可穿戴服装中, 利用其在外热刺激后的变形和应力产生驱动力。优点在于使用形状记忆合金作为驱动器可以显著减轻重量(仅 0.4285 公斤), 并且无需额外电源即可实现较大的收缩力。如图 2(c)所示, Lietal 基于聚氯乙烯凝胶在

不同电极下蠕变的特性,设计了步行辅助穿戴装置,并将其应用于模拟大腿肌肉的收缩功能,为髋关节屈曲提供辅助[19]。韩国机械与材料研究所开发的SMA弹簧仿生织物外骨骼仅重119 g,通过PWM脉冲调制控制加热电流,结合锰钢片储能释放与风冷混合冷却[20]。佳木斯大学信息电子技术学院研究团队将气动人工肌肉应用于康复设备,通过膝关节周围布置气动人工肌肉的伸张和收缩过程实现下肢的旋转和抬升[21]。

综上所述,柔性外骨骼是一种旨在增强或辅助人体运动功能的可穿戴设备,其驱动方式直接影响其性能和适用场景。常见的柔性外骨骼驱动方式包括绳索驱动和智能材料驱动。以下是对这两种驱动方式优缺点的总结:

1) 绳索驱动系统通常采用串联弹性驱动器和鲍登线等柔性传动方式,将驱动器与机器人关节分离,减轻关节质量,提高柔顺性。

优点: 关节柔顺性高,由于驱动器与关节分离,关节部分质量减轻,柔顺性提高,有利于模仿人体自然运动。结构简单,采用柔性传动方式,减少了关节部件数量,降低了机械复杂性。可以实时检测关节力矩和位置,依靠多信号的反馈实现精准控制。

缺点: 控制精度要求高,由于绳索传动的弹性和摩擦特性,控制系统需要高精度算法来确保精确运动。负载能力有限,绳索驱动系统的负载能力受限,可能不适用于需要高负载支持的场景。

2) 智能材料驱动系统利用形状记忆合金、电活性聚合物等智能材料的特性,实现驱动功能。

优点: 高功率密度,智能材料如形状记忆合金具有高功率密度,能够在小体积内提供较大的驱动力。柔性和可变形性,智能材料具有的柔性和可变形特性,使其适合用于需要柔顺性的应用场景。低能耗,智能材料驱动器通常能耗较低,适合于对能耗敏感的应用。

缺点: 响应速度慢,智能材料的响应时间相对较长,可能限制其在需要快速响应的应用中的使用。控制复杂性高,由于材料特性的非线性和滞后性,控制系统设计复杂,需要精确的建模和控制策略。耐久性问题,智能材料在长期使用中可能出现性能衰退,影响系统的可靠性。

绳索驱动系统在关节柔顺性和结构简洁性方面具有优势,但在控制精度和负载能力上存在挑战;而智能材料驱动系统则在功率密度和柔性方面表现突出,但在响应速度、控制复杂性和耐久性方面需要进一步优化。选择适合的驱动方式应根据具体应用需求和技术成熟度进行权衡。

2.3. 柔性外骨骼在步态矫正领域的应用

步态矫正是通过外骨骼或其他辅助装置,帮助存在步态问题的患者恢复或改善步态功能的过程。步态矫正的基本目标是恢复患者的自然步态,提高行走的稳定性、舒适性和效率。然而,步态矫正过程需要考虑步态的生物力学特点,并应对不同矫正方法所面临的多种挑战。当前柔性外骨骼技术在步态矫正领域的研究主要集中在基于绳索驱动下肢外骨骼和智能驱动下肢外骨骼两方面的研究。

2.3.1. 基于绳索驱动的柔性下肢外骨骼系统

基于绳索驱动的柔性下肢外骨骼步态矫正的研究主要集中在美国、日本和国内的一些科研院校。如图3(a)所示,为哈佛大学生物力学实验室在2020年研发的一款无铰链轻量化膝关节助力外骨骼服[22]。其采用软性纺织材料与刚性部件结合设计,通过鲍登电缆传递力量并集成惯性测量单元(IMU)实时追踪步态。该设备通过多控制点贝塞尔曲线生成可调辅助力曲线,支持正/负功率辅助模式,并引入基于运动捕捉的膝关节超伸保护算法。实验针对6名健康受试者进行10°坡度行走测试,结果显示:在上坡行走中,膝关节正功率显著降低(左侧 $17.5\% \pm 3.21\%$, $p = 0.005$;右侧 $23.2\% \pm 3.54\%$, $p = 0.008$),股四头肌肌电活动呈下降趋势;下坡行走时膝关节负功率减少11.4%(右侧, $p < 0.001$)。设备单侧重量仅1.14 kg,验证

了无铰链设计对自然步态的透明性(关节角度偏差 $< 2.8^\circ$)，为膝关节功能障碍患者提供了动态辅助新方案。

2021 年，中国科学院深圳先进技术研究院研发了一款柔性髋关节外骨骼系统，并针对髋关节辅助模式对行走代谢消耗的影响进行了系统研究[23]。如图 3(b)所示，该外骨骼采用 Bowden 线传动与便携式致动单元，结合 PD 迭代学习控制器精确地提供助力矩，分别测试了髋关节伸展辅助(HEA)、屈曲辅助(HFA)和伸展屈曲复合辅助(HEFA)三种模式。7 名受试者在负重(15 kg)与非负重两种条件下的实验表明，相较无辅助情况，HEA 与 HEFA 模式在负重行走中分别显著降低了 9.95% 和 15.28% 的净代谢消耗($p < 0.05$)，而 HFA 模式无显著改善($p = 0.202$)。研究证实，复合辅助模式(HEFA)对行走能效的提升最为显著，显示出多运动辅助模式在柔性外骨骼设计中的优势与应用潜力。

图 3(c)为美国亚利桑那州立大学研发的一款新型柔性踝关节外骨骼机器人 SR-AFO [24]，采用平面织物气动人工肌肉驱动，可实现人类步态的节律同频化。该研究通过对踝关节施加周期性气动跖屈干扰，以考察外骨骼诱导步态同频化的能力。实验表明，10 名受试者在固定步速条件下均可实现步态频率提高 15% 的同频化，而在变速条件下则可实现最高 53.3% 的频率提高，明显高于传统刚性踝关节外骨骼(约 7%)的同频化能力。受试者的步态相位锁定始终发生于推动阶段，证实了柔性外骨骼机器人在步态适应性和康复应用中具有显著优势和潜力。

2023 年，苏州大学团队研发了一款串联弹性驱动髋关节外骨骼(重量 3.2 kg) [25]，如图 3(d)所示。提出了基于虚拟刚度补偿的自适应控制框架，通过近似动态规划在线调整刚度参数以改善步态对称性。实验招募 5 名健康受试者，在 0.8~1.4 m/s 步行速度下评估辅助效果。结果显示：穿戴外骨骼后，髋屈肌(股直肌)和伸肌(股二头肌)的肌电活动(EMG)分别降低 20.7%~36.8% 和 16.7%~34.6%，代谢消耗下降 7.43%~13.41% ($P < 0.05$)；通过自适应调整双侧刚度，步态不对称指数从初始 0.81 降至 0.07，关节角度 - 速度协同轨迹显著收敛。该研究验证了外骨骼在无需步态相位预测的情况下，可实时优化步态对称性并降低肌肉能耗，为神经疾病患者步态康复提供了新方案。

2023 年，中国科学院深圳先进技术研究院与工业和信息化部产业发展促进中心联合发表了对脑瘫儿童康复助行外骨骼机器人的综述研究[26]。文章分析了脑瘫儿童外骨骼相较于成人外骨骼的特殊设计需求，指出当前脑瘫儿童外骨骼存在结构过重、控制策略单一、适应性不足等问题，特别强调了多关节柔性驱动技术在实现步态改善与提高行走效率方面的重要性。同时，该研究提出了未来外骨骼设计需关注个性化助力控制策略、深层肌腱力信息的非侵入式实时感知等关键技术方向，进一步提高脑瘫儿童步态康复的安全性与有效性。同年，中科院沈阳自动化研究所研究出了一种适用于柔性外骨骼的控制系统，旨在提高人体步态辅助的自然性和自适应能力[27]。如图 3(e)所示，该系统利用高斯函数生成助力曲线，实现实时连续调整，以小腿摆动角度作为输入变量，使用户在辅助时机和辅助方式上对外骨骼进行自主控制。此外，该系统还可以通过在线更新参数，适应不同用户的步态模式，精确跟踪期望助力曲线，在不同行走速度的实验测试中，外骨骼表现出良好的自适应能力，显著降低被试行走与肌肉活动水平的代谢成本。

如图 3(f)所示，为南京航空航天大学在 2023 年研发的一款基于人体运动意图识别的柔性膝关节外骨骼系统[28]。该系统采用扭绳驱动器作为执行机构，提供膝关节运动辅助。系统通过采集表面肌电信号，建立肌肉骨骼模型，以实时估计膝关节力矩与刚度，并采用一种基于模糊 PD 控制策略的助力控制方法，根据人体运动意图和实时关节刚度动态调节助力矩。实验结果显示，该控制策略能有效跟踪人体运动意图，实现精确的步态辅助，并提高穿戴舒适性和使用效率，为柔性外骨骼的智能化与个性化控制提供了重要参考。

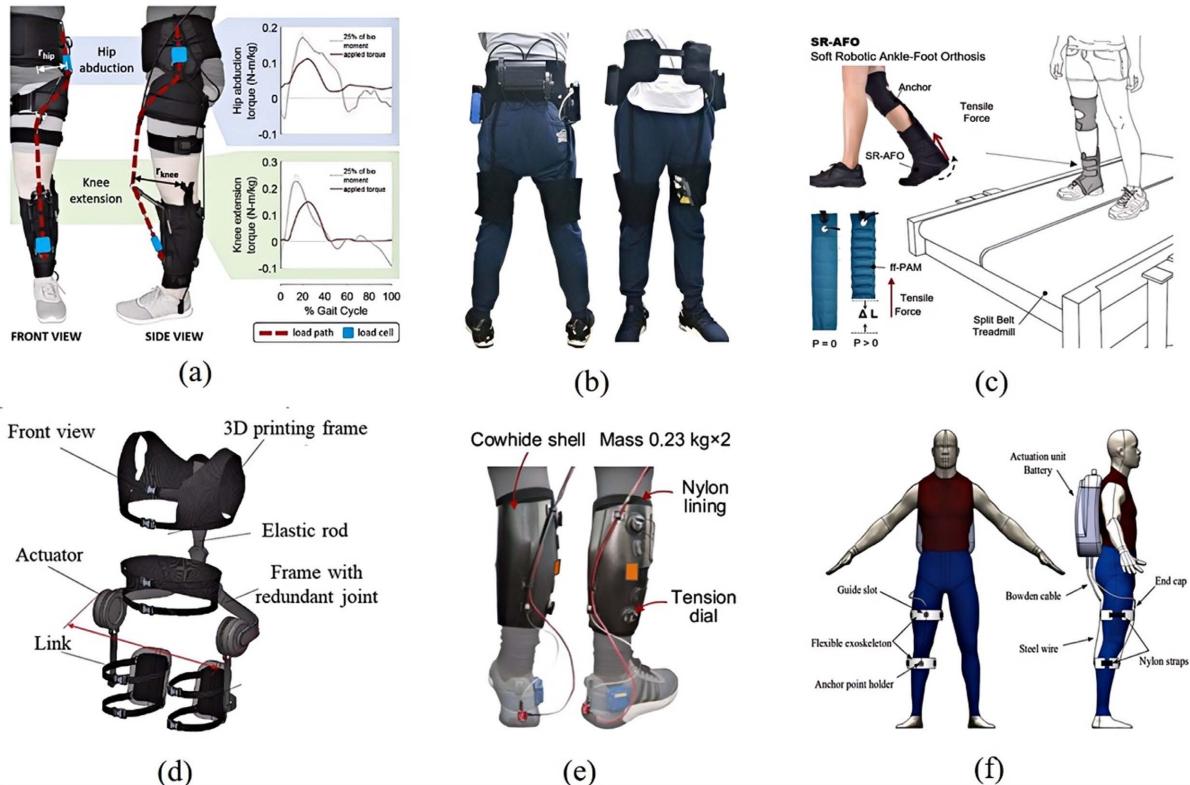


Figure 3. Flexible lower limb exoskeleton system based on rope drive: (a) Lightweight knee power exoskeleton suit; (b) Flexible hip exoskeleton system; (c) Flexible ankle exoskeleton robot; (d) Tandem elasticity drives the hip exoskeleton; (e) Flexible exoskeleton system; (f) Flexible knee exoskeleton system

图 3. 基于绳索驱动的柔性下肢外骨骼系统：(a) 轻量化膝关节助力外骨骼服；(b) 柔性髋关节外骨骼系统；(c) 柔性踝关节外骨骼机器人；(d) 串联弹性驱动髋关节外骨骼；(e) 柔性外骨骼系统；(f) 柔性膝关节外骨骼系统

2.3.2. 基于智能驱动的柔性下肢外骨骼系统

基于智能驱动的柔性下肢外骨骼的研究较少，多集中于智能材料、智能方式的驱动。如南京医科大学第一附属医院在2020年研究出的一种矫正衣[29]对脑卒中半身不遂患者的康复效果立竿见影，如图4(a)所示。研究发现，穿戴动态矫正衣后患者在站立位前伸够物时，躯干前屈和侧屈的角度明显减小，三角肌前束、中束、斜方肌上部、肱二头肌、股直肌、臀中肌和腓肠肌的肌电积分值明显增加，肱三头肌的协同收缩率也明显提高。结果表明，矫正衣可以辅助偏瘫患者稳定姿势，限制异常代偿动作，增强上下肢肌肉控制能力，为患者在卒中姿势和运动功能的恢复提供了一种新的康复工具。2022年，中国五冶集团有限公司医院康复医学科研发了一款基于虚拟现实(VR)的下肢机器人多任务步态训练平台[30]，图4(b)为该平台的构建框架。该平台在传统下肢机器人的基础上，集成了VR技术、眼动与平衡训练技术、非侵入式神经调控技术、可穿戴肌电(sEMG)及近红外光脑成像系统设备，通过虚拟场景任务导向训练、多指标同步监测(包括步态、眼动参数、肌电积分及脑血红蛋白浓度变化)实现多感官刺激与个性化训练。在50例早期脑卒中偏瘫患者9周的临床试验中，使用该平台的患者在下肢运动功能(FMA评分)、平衡能力(BBS评分)、日常生活能力(MBI评分)及步行功能(Holden分级)方面均显著优于传统单纯机器人训练组($p < 0.05$)，证明该平台能有效提高偏瘫患者的步态康复效果。

如图4(c)所示，为韩国延世大学与韩国亚洲大学联合开发的一款服装型柔性助行外骨骼机器人[31]，着重于提高穿戴舒适性。研究比较了裤型和套装型两种设计，通过脑电(EEG)分析与主观满意度评价评估穿戴舒适性。脑电数据显示，静坐时裤型设计舒适性更高，但在行走状态下套装型更优，表现出更高的 α

波(放松状态)和更低的 β 波(紧张状态)。主观评价亦显示套装型在安全性、舒适性、功能性、设计美观性与易用性方面均更受青睐。研究结果表明,套装型设计通过稳定的背带支撑实现了更好的运动舒适性,为柔性穿戴机器人未来的设计提供了重要的参考依据。

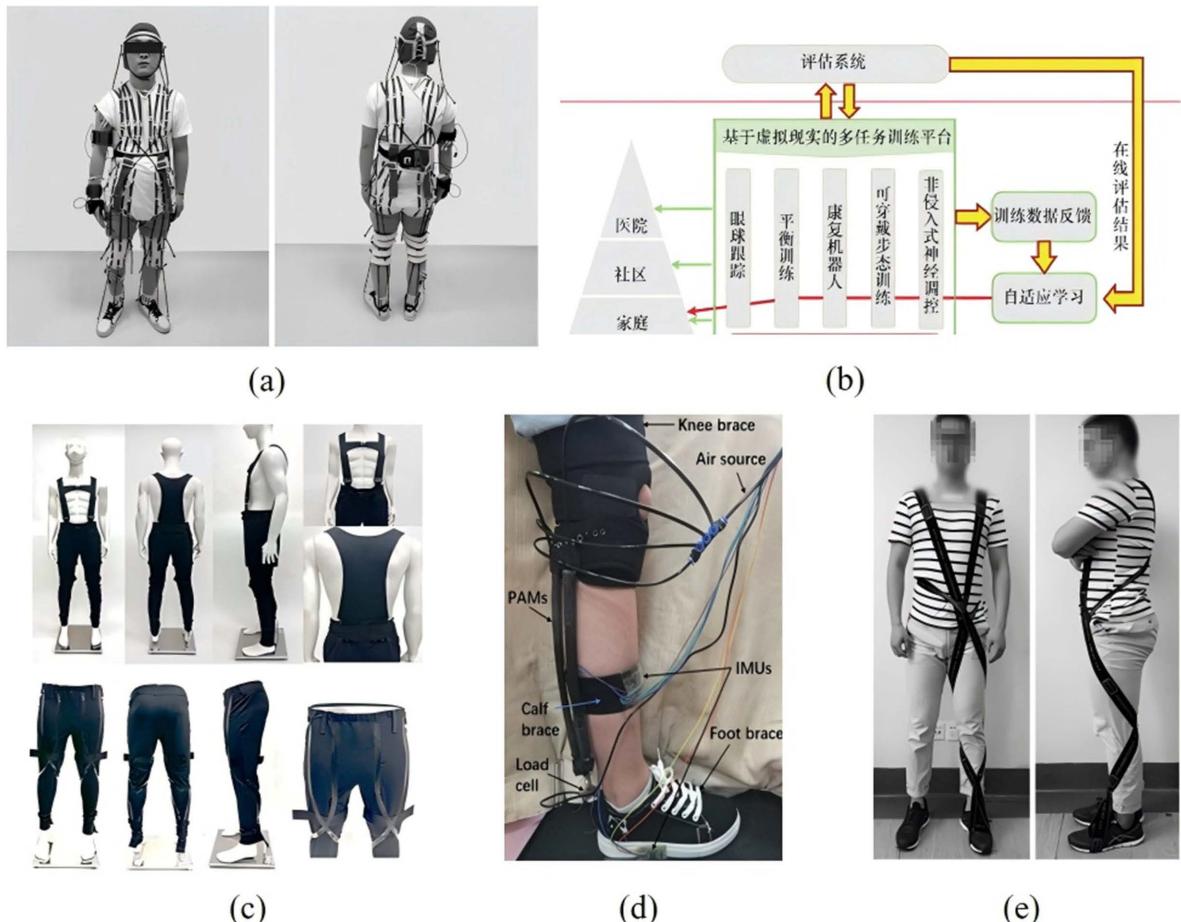


Figure 4. Flexible lower limb exoskeleton system based on intelligent drive: (a) Corrective clothing; (b) Multi-task gait training platform based on virtual reality; (c) Clothing type flexible exoskeleton robot; (d) Pneumatic lower limb orthopedic device; (e) Homemade hemiplegic walking orthopedic belt

图 4. 基于智能驱动的柔性下肢外骨骼系统: (a) 纠正衣; (b) 基于虚拟现实的多任务步态训练平台; (c) 服装型柔性助行外骨骼机器人; (d) 气动下肢矫形装置; (e) 自制偏瘫步行矫形带

如图 4(d)所示,为山东大学团队研发的一款柔性下肢步态辅助装置[32],其重量仅有 680 g。该装置采用柔性气动人工肌肉作为执行器,通过小腿和足部绑带上的 IMU 惯性测量单元实时检测步态周期,在踝关节跖屈期触发气动驱动。该装置由 4 组自研 PAMs (初始编织角 22°, 阈值压力 30 kPa)组成,通过硅胶管 - 尼龙线传动系统提供助力。实验结果表明,在 0.83 m/s 步行速度下,装置可输出峰值 65 N 的跖屈力,相当于踝关节自然生物力的 3.5% ($p < 0.05$); PAMs 在 110 kPa 压力下最大收缩率达 24%,单次充气响应时间 0.1 秒。研究通过柔性材料实现了与人体关节的结合,提供了轻量化步态辅助。

如图 4(e)所示,为中国苏州医院团队研发自制的偏瘫步行矫正带[33]。该团队对 30 例慢性脑卒中患者进行了 3 周训练,矫正带组屈髋峰值从 $32.9^\circ \pm 6.6^\circ$ 提升至 $37.7^\circ \pm 5.9^\circ$ ($p < 0.05$),步速从 0.42 m/s 增加到 0.52 m/s ($p < 0.05$),显著优于对照组;其组合绑法(前拉法 + 髋内旋拉法)通过助力踝背屈、屈膝屈髋,激

活中枢模式发生器，优化步态对称性。

3. 结论与展望

随着外骨骼技术的发展，柔性外骨骼作为一种新兴的康复辅助设备逐渐成为运动功能障碍患者和老年人生活中不可或缺的一部分。本研究通过文献综述，发现轻便的外骨骼已经成为一种普遍趋势。目前的柔性下肢外骨骼在步态矫正领域的研究主要基于绳索驱动的外骨骼，一些较为成熟的外骨骼系统已投入到临床试验。在驱动控制方面，基于角度和力信号的自适应控制方法较为常见，同时，研究人员开始关注基于变刚度原理的柔性外骨骼。

在步态矫正领域柔性外骨骼系统的研究中，仍然存在几个重要的挑战：

1) 高效的步态矫正十分困难。柔性驱动采用更符合人体工学的柔性材料，与刚性材料相比，这增加了系统的灵活性，但因此无法达到刚性驱动的辅助水平，不足以支撑人体自身的重量。需要通过材料创新、优化机械结构和提高控制的精度来提升步态矫正的效果。

2) 人体步态异常辅助模型建立困难。柔性下肢外骨骼顺应性强，能够更好地跟踪下肢的运动，从而显著改善外骨骼适配性和安全舒适性。柔性外骨骼的矫正模型需要对人体生物力学、运动学和动力学进行全面分析，这增加了外骨骼开发的难度，尤其是不能局限于单个平面的矫正辅助，需要推广到多维平面的矫正。

3) 人机交互机制的优化。实现矫正辅助和人机协同运动的界面分析安全性和可靠性。同时，提高柔性下肢外骨骼的可穿戴性，例如，针对不同身高体重穿戴者适应性调整的问题，以及柔性外骨骼对不同异常步态矫正时的配合问题。

因此，柔性下肢外骨骼在步态矫正领域有以下发展趋势：

首先，优化柔性下肢外骨骼柔顺驱动的设计。一方面，在仿生设计和驱动设计上进行创新研究。通过模拟人体下肢肌肉骨骼系统的运动规律，提高驱动的柔顺性。另一方面，柔性创新材料的应用有着广阔的前景，同时考虑解决非线性系统和刚度调节等问题。

其次，创新人机耦合环境中多模态的信息反馈控制。根据外骨骼矫正的目标，收集关节角度信号、肌电信号等多模态信息，进行多维步态矫正分析，并整合反馈控制方法以适应人体肌肉骨骼系统，提升人机兼容性和步态矫正效果。

参考文献

- [1] 钱竟光, 宋雅伟, 叶强, 等. 步行动作的生物力学原理及其步态分析[J]. 南京体育学院学报(自然科学版), 2006, 5(4): 1-7, 39.
- [2] Kento, H., Yohei, O., Taichi, K., et al. (2022) Efficiency and Stability of Step-To Gait in Slow Walking. *Frontiers in Human Neuroscience*, **157**, Article 79920.
- [3] (2024) Global, Regional, and National Burden of Disorders Affecting the Nervous System, 1990-2021: A Systematic Analysis for the Global BURDEN of Disease Study 2021. *The Lancet Neurology*, **23**, 344-381.
- [4] 施杰洪, 王宇华. 机器人技术在康复医学领域的应用现状与进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2024, 5(6): 1154-1166.
- [5] 李相汝, 谢金菁. 外骨骼技术: 科技重塑人类极限[J]. 军事文摘, 2025(5):7-12.
- [6] 李明, 李慧, 喻洪流. 下肢外骨骼康复机器人的分类及其应用现状[J]. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(4): 833-839.
- [7] Liang, J., Zhang, Q., Liu, Y., Wang, T. and Wan, G. (2022) A Review of the Design of Load-Carrying Exoskeletons. *Science China Technological Sciences*, **65**, 2051-2067. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2145-x>
- [8] 陈安迪, 干静, 屈楚离, 等. 有源外骨骼机器人外观造型发展趋势[J]. 机械, 2020, 47(9): 73-80.
- [9] Li, S., Zhang, L., Meng, Q. and Yu, H. (2023) A Real-Time Control Method for Upper Limb Exoskeleton Based on

- Active Torque Prediction Model. *Bioengineering*, **10**, Article 1441. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121441>
- [10] 张秀, 张宇斐, 焦志伟. 康复机器人研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2020, 41(4): 97-102.
- [11] Asbeck, A.T., Dyer, R.J., Larusson, A.F. and Walsh, C.J. (2013) Biologically-Inspired Soft Exosuit. 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), Seattle, 24-26 June 2013, 1-8. <https://doi.org/10.1109/icorr.2013.6650455>
- [12] Asbeck, A.T., Schmidt, K., Galiana, I., Wagner, D., Walsh, C.J. (2015) Multi-Joint Soft Exosuit for Gait Assistance. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, 26-30 May 2015, 6197-6204. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140069>
- [13] Bartenbach, V., Schmidt, K., Naef, M., Wyss, D. and Riener, R. (2015) Concept of a Soft Exosuit for the Support of Leg Function in Rehabilitation. 2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), Singapore, 11-14 August 2015, 125-130. <https://doi.org/10.1109/icorr.2015.7281187>
- [14] Gasparri, G.M., Bair, M.O., Libby, R.P. and Lerner, Z.F. (2018) Verification of a Robotic Ankle Exoskeleton Control Scheme for Gait Assistance in Individuals with Cerebral Palsy. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, 1-5 October 2018, 4673-4678. <https://doi.org/10.1109/iros.2018.8593904>
- [15] Gasparri, G.M., Luque, J. and Lerner, Z.F. (2019) Proportional Joint-Moment Control for Instantaneously Adaptive Ankle Exoskeleton Assistance. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **27**, 751-759. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2019.2905979>
- [16] 李梦, 叶姣, 孙诚, 等. 绳驱并联机器人的滑轮运动学研究[J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46(2): 203-208.
- [17] Pittaccio, S. and Viscuso, S. (2012) Shape Memory Actuators for Medical Rehabilitation and Neuroscience. In: Berselli, G., Vertechy, R. and Vassura, G., Eds., *Smart Actuation and Sensing Systems—Recent Advances and Future Challenges*, InTech. <https://doi.org/10.5772/50201>
- [18] Kim, C., Kim, G., Lee, Y., Lee, G., Han, S., Kang, D., et al. (2020) Shape Memory Alloy Actuator-Embedded Smart Clothes for Ankle Assistance. *Smart Materials and Structures*, **29**, Article ID: 055003. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ab78b5>
- [19] Li, Y. and Hashimoto, M. (2017) PVC Gel Soft Actuator-Based Wearable Assist Wear for Hip Joint Support during Walking. *Smart Materials and Structures*, **26**, Article ID: 125003. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa9315>
- [20] Park, S.J. and Park, C.H. (2019) Suit-Type Wearable Robot Powered by Shape-Memory-Alloy-Based Fabric Muscle. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 9157. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45722-x>
- [21] 孟祥宇, 袁铭润. 一种基于气动人工肌肉的下肢康复设备设计[J]. 中国科技信息, 2023(13): 86-88.
- [22] Asbeck, A.T., De Rossi, S.M.M., Holt, K.G. and Walsh, C.J. (2015) A Biologically Inspired Soft Exosuit for Walking Assistance. *The International Journal of Robotics Research*, **34**, 744-762. <https://doi.org/10.1177/0278364914562476>
- [23] Park, E.J., Akbas, T., Eckert-Erdheim, A., Sloot, L.H., Nuckols, R.W., Orzel, D., et al. (2020) A Hinge-Free, Non-Restrictive, Lightweight Tethered Exosuit for Knee Extension Assistance during Walking. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, **2**, 165-175. <https://doi.org/10.1109/tmrbi.2020.2989321>
- [24] Cao, W., Chen, C., Hu, H., Fang, K. and Wu, X. (2021) Effect of Hip Assistance Modes on Metabolic Cost of Walking with a Soft Exoskeleton. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **18**, 426-436. <https://doi.org/10.1109/tase.2020.3027748>
- [25] Thalman, C., Debeurre, M.P. and Lee, H. (2021) Entrainment during Human Locomotion Using a Soft Wearable Ankle Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **6**, 4265-4272. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3066961>
- [26] Zhang, T., Li, Y., Ning, C. and Zeng, B. (2024) Development and Adaptive Assistance Control of the Robotic Hip Exoskeleton to Improve Gait Symmetry and Restore Normal Gait. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **21**, 799-809. <https://doi.org/10.1109/tase.2022.3229396>
- [27] 范玫彬, 陈春杰, 王灿, 等. 脑瘫儿童康复助行外骨骼机器人研究与展望[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 1-10.
- [28] Huang, K., Xu, J., Zhang, T., Lu, Y., Xu, L. and Li, Y. (2023) Design and Control of Soft Exoskeleton Based on Human Motion Intention. 2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), Sanya, 8-10 July 2023, 1047-1052. <https://doi.org/10.1109/icarm58088.2023.10218928>
- [29] 郭川, 卞海波, 赵坤坤, 等. 动态矫正衣对脑卒中患者前伸够物时躯干运动和肢体表面肌电的即刻效应分析[J]. 中国康复, 2020, 35(10): 507-511.
- [30] 马良飞, 何蓬莉, 曾西西, 等. 基于虚拟现实的下肢机器人多任务步态训练平台在早期偏瘫患者中的应用[J]. 北京生物医学工程, 2022, 41(5): 495-499, 505.
- [31] Yoon, J.E., Chung, J., Park, S., Won, H., Kim, C., Baek, I., et al. (2024) Evaluation of Gait-Assistive Soft Wearable

- Robot Designs for Wear Comfort, Focusing on Electroencephalogram and Satisfaction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **9**, 8834-8841. <https://doi.org/10.1109/Lra.2024.3433834>
- [32] Gu, Y., Lv, Y., Ma, X. and Lu, C. (2018) Lower-Limb Soft Orthotic Device for Gait Assistance. 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, 14-16 December 2018, 894-897. <https://doi.org/10.1109/itoec.2018.8740407>
- [33] 王盛, 郭川, 龚晨, 陈伟伽, 王雨辰, 顾昭华. 自制偏瘫步行矫正带对慢性期脑卒中患者伸肌协同偏瘫步态的运动学及时空参数影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2018, 40(10): 740-744.