

外骨骼机器人可穿戴性能的设计现状及发展趋势

梁志¹, 李俊^{*1,2}

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

摘要:通过文献调查法,梳理了外骨骼机器人与人体结构的匹配情况及其在活动工效方面的应用成果,介绍了外骨骼机器人的基本类型及特点,重点分析外骨骼机器人研发中涉及的可穿戴性能优化设计方法及成效,总结展望其可穿戴性能设计的发展途径。研究认为,可以从分体式结构设计、轻量化设计、柔性化设计以及可调整结构设计4个方面对外骨骼机器人进行深入探讨和开发,从而更好地提升其可穿戴性能。

关键词: 外骨骼; 机器人; 可穿戴性; 舒适性; 设计

中图分类号: TS 941.731 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)02-0102-08

Design Status and Development Trend of Wearable Performance of Exoskeleton Robots

LIANG Zhi¹, LI Jun^{*1,2}

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Key Laboratory of Clothing Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Through the literature survey method, this paper sorted out the matching of exoskeleton robots and human body structure and the application results of activity ergonomics. It introduced the basic types of exoskeleton robots and their characteristics, and focused on analyzing the wearable performance optimization design methods and results involved in the research and development of exoskeleton robots. Then it summarized and looked forward to the development path of wearable performance design. It is concluded that in-depth research and development of exoskeleton robots from the four aspects of split structure design, lightweight design, flexible design and adjustable structure design can better improve their wearable performance.

Key words: exoskeleton, robots, wearability, comfort, design

智能服装作为服装与电子信息、材料科学、人工智能、机械工程等多学科融合的产物,满足了人们对于舒适性、便捷性、智能化等方面的需求^[1-3]。随着机器人行业的快速发展,许多学者将外骨骼机器人技术融入智能可穿戴设备中,使外骨骼机器人成为智能服装的表现形式之一。外骨骼机器人技术是将传感、控制、信息、移动计算等技术进行融

合,通过模仿生物界外骨骼,为穿戴者提供保护或身体支撑,且能够在穿戴者的控制下完成特定任务的综合技术^[1,4]。随着科学技术的快速进步和发展,为了满足人们对完成特定动作的需求,提升人体相关的运动能力,以及帮助人体进行康复治疗,外骨骼机器人应运而生,并在不断的发展、完善中日趋成熟。

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2024-02-26。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2232024G-08)。

作者简介: 梁志(1999—),男,硕士研究生。

*通信作者: 李俊(1970—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为功能防护服装。Email: lijun@dhu.edu.cn

如今,外骨骼机器人技术在军事、医疗、工业等领域都有着广泛的应用。在军事领域,通过将外骨骼穿戴在士兵身上,可以减轻士兵负重,提高军队作战效能。在外骨骼装备的作用下,士兵不仅可以保持良好的机动状态,还可以形成完整的作战系统,显著提升整体作战能力。在医疗领域,外骨骼机器人多用于有运动障碍患者的辅助康复治疗,如行走训练、手臂运动训练等,以提升患者行走及生活自理的能力。在工业领域,外骨骼机器人主要用于生产制造、施工救援、运输货物等方面,不仅可以帮助工人们减轻工作负荷,因其体积较小,还可以在狭窄地形中辅助作业人员进行重物搬运,解决大型车辆无法驶入的问题,大大提升工作效率^[5]。在消防领域,外骨骼机器人有助于减轻消防员的负重,提升其防御能力,从而在灭火救援时更大程度地保障消防员的生命安全^[6]。

外骨骼机器人的整体或局部多具有刚性属性,附加于人体时因与人体结合度欠佳,会不同程度地影响人体关节的活动。然而,现有关于外骨骼机器人技术的研究主要围绕机械开发^[7]和性能提升^[8]等方面,较少对装备的可穿戴性能进行分析。文中基于现有外骨骼机器人技术发展和应用现状,从装备的着装舒适性角度出发,对其可穿戴性进行分析,总结现有装备存在的不足以及未来的发展趋势。

1 外骨骼机器人类型及特点

工业革命后,人类发明创造出各种功能和用途的工具,并运用到生产和生活中。在生产活动中,人体的力量往往受到限制,且躯体缺乏有效保护,因此,能够增强人体肌肉能力并且能有效保护人体的装备一直受到关注。在自然界中,螃蟹、乌龟等生物的坚硬外壳为其内部器官提供了支撑与保护,研究人员便从这些生物的结构中获得灵感,设计出外骨骼装备,进而与人体结构相结合,制造出外骨骼机器人^[9]。外骨骼机器人在研究初期是用于军事领域,士兵通过外骨骼机器人增强自身力量,提升作战效能。随着科学技术的快速发展,外骨骼机器人逐渐被引入医疗康复领域,用于帮助肢体残障或者功能障碍群体站立或行走^[10]。根据驱动方式的不同,外骨骼机器人可分为有动力和无动力两大类^[11]。

1.1 有动力外骨骼机器人

有动力外骨骼机器人的驱动方式包括:采用电动机独立驱动、电动机和液压相结合、电动机和绳

索相结合等,并借助髋关节、膝关节、踝关节等部位的助力完成整体的驱动。有动力外骨骼机器人自诞生以来便得到广泛关注。

以色列 ReWalk 公司设计研发的动力外骨骼机器人如图 1 所示^[12]。图 1 中的外骨骼机器人利用电机对独立控制的双侧髋关节和膝关节进行驱动,利用弹簧对踝关节进行辅助驱动,其新颖之处在于用户能够主动控制行走。实验结果显示,该设备能够帮助脊髓损伤导致截瘫的患者在没有他人协助的情况下独立进行转移和行走至少 50 ~ 100 m,持续 5 ~ 10 min,然而该设备的缺点是尺寸调节范围小,无法适用于体型较大的受试者^[12]。



图 1 ReWalk 外骨骼机器人
Fig.1 ReWalk exoskeleton robot

哈佛大学研发的第 2 代柔性外骨骼 Soft Exosuit 如图 2 所示^[13]。Soft Exosuit 通过电机卷扬 Bowden 电缆对髋关节和踝关节进行驱动^[13-14],从而实现髋部和踝部的弯曲、伸展,并且能够降低穿戴者约 6% 的生物代谢能量。该设备引入了一种新型弹性织物带,更加符合人体工学,且质量更轻,便于穿戴。



图 2 Soft Exosuit 外骨骼
Fig.2 Soft Exosuit exoskeleton

2020 年,北京航空航天大学研发了一种可实现跖屈-背屈双向运动辅助的绳驱动踝关节外骨骼,具体如图 3 所示^[15]。绳驱动踝关节外骨骼利用电动机和绳索分别实现踝关节跖屈和背屈双向运动辅助。装置末端的执行器与用户运动兼容,通过滑

轮/齿轮的电缆传输可以提高外骨骼驱动效率。实验表明,受试者在穿戴该外骨骼并提供外力的情况下,比目鱼肌的活动相较于未穿戴时降低了 5.2%,说明该外骨骼装置有助于降低穿戴者的能量消耗^[15]。绳驱动踝关节外骨骼的特点在于通过调整装置的局部构造,减轻在人体腿部额外增加的质量,由此降低设备对使用者造成的负担。



图 3 绳驱动外骨骼

Fig. 3 Rope-driven exoskeleton

有动力外骨骼机器人需要外部动力源的支持,因此会产生装备成本高、笨重、续航不足等问题,且穿着者的行走灵活性受到限制,人机协调性较差,后期需重点改善其实用性和适配性。

1.2 无动力外骨骼机器人

无动力外骨骼机器人结构紧凑、轻巧,因此使用起来较便捷且节省能源。其通常采用流体和涡卷弹簧、形状记忆合金、弹性软体材料等元件达到助力人体运动的目的。

美国 Ekso Bionics 公司是无动力外骨骼机器人领域的开创者,其研发的 EksoVest 利用主力弹簧提供助力载荷,以实现对佩戴者的行动助力(见图 4)^[16]。该外骨骼机器人利用助力弹簧激活后驱动器产生反作用力,通过传动连杆传导至穿戴者的背部及腰部,并对集中力进行分散处理,为穿戴者提供支撑力及运动辅助。该装置的特点在于主力弹簧型号可以根据不同的工况进行选择,以提供不同强度的助力;尺码也有多种规格,以适应不同体型的人群。

清华大学研发的无动力储能式截瘫助行外骨骼如图 5 所示^[17]。该外骨骼利用储能弹簧作为助力元件,通过建立截瘫患者下肢站立中期到后期的动力学模型,提出弹簧刚度的优化设计方法,并最终选定了 3 180 N/m 和 1 279 N/m 作为无动力助行外骨骼储能弹簧的刚度参数。该装置的特点在于能够为不同身高、体质量和损伤情况的患者提供精准化助行。



图 4 EksoVest 外骨骼

Fig. 4 EksoVest exoskeleton

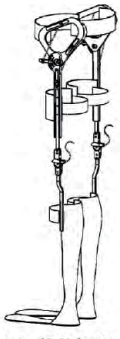


图 5 无动力储能式外骨骼

Fig. 5 Unpowered energy-stored exoskeleton

2019 年,浙江大学成功研制出无动力型下肢外骨骼(见图 6)^[18]。该外骨骼整体结构简单,利用弹性绷带实现整个系统的自我支撑。其中,位于膝关节处的弹性阻尼机构和自锁式离合器在穿着者行走过程中利用人体重心下移为弹簧储能,并在重心上移时释放储存的能量,从而实现助力。通过适当调整离合器在滑竿上的位置,可让弹簧在恰当的时机释放能量。然而,由于装置大多采用刚性结构,致使穿着者活动的灵活性受到限制。



图 6 浙江大学研制的外骨骼

Fig. 6 Exoskeleton developed by Zhejiang University

对于无动力外骨骼,可以在控制精度以及多关节控制的模块化设计方面继续深入研究,从而更好地实现穿戴效果。

2 外骨骼机器人可穿戴性设计现状

外骨骼机器人使用了较多的非服装用材料,因此如何使外骨骼机器人装置的设计更加符合人体工学要求,使之在实现功能的同时提升舒适性及可穿戴性,是学者近年来的研究热点。

2.1 质量的控制及优化

作为一种可供人体穿戴的装置,外骨骼机器人的质量应在人体的可承受范围内。为减轻对人体的压力,越来越多质量轻便的材料应用于外骨骼机器人设备中。

南京工程学院研发了一种基于柔性传动的下肢外骨骼助力机器人(见图 7)^[19]。为减轻质量,该机器人各连接部件采用轻质铝合金材料;背部、腰部及腿部的绑缚带均采用尼龙材料的柔性构件;在保证支撑作用的前提下,采用质量更小的合金材料,以减轻对穿着者的压力。东华大学设计了一款轻质铝合金下肢助力外骨骼(见图 8)^[20]。该装置同样引入铝合金材料,以减轻设备的整体质量,方便人体穿戴;通过使用盘式电机驱动机构优化外骨骼横向扁平结构,利用盘式电机体积小、结构紧凑的特点减轻装置质量。上海傅里叶智能科技有限公司开发了一款医疗康复用下肢外骨骼机器人^[21],通过使用大量碳纤维复合材料减轻人体在穿戴过程中的负重感,装置整体结构的刚度也得到明显的提升。

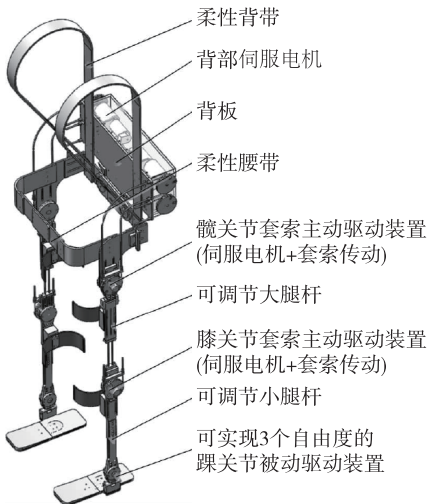


图 7 下肢外骨骼助力机器人

Fig. 7 Lower limb exoskeleton assisted robot

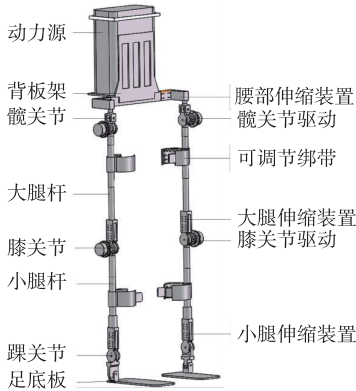


图 8 下肢助力外骨骼

Fig. 8 Lower limb assisted exoskeleton

2.2 部件的柔性化设计

柔性化结构部件的引入使外骨骼机器人的可穿戴性能得到了极大提升。2014 年,卡内基梅隆大学通过改变传统外骨骼机器人的刚性结构框架,设计了一款由弹性人造肌肉制动器和软织物套筒组成的柔性外骨骼机器人(见图 9)^[22]。该设备的裤管由织物制成,可以减轻设备质量,同时更易于佩戴。2021 年,北京工业大学研发了一种可穿戴下肢柔性外骨骼机器人助力外衣(见图 10)^[23],并进行步态预测研究。该设备采用外表面粗糙且具有弹性的外衣作为基体,能够与下肢皮肤表面紧密贴合;采用形状与腰和大腿外形吻合的尼龙开口环固定腰部和大腿,并用魔术贴将开口环拉紧封闭,提升了可穿戴性和穿着舒适性。



图 9 柔性外骨骼机器人

Fig. 9 Flexible exoskeleton robot



图 10 柔性外骨骼机器人助力外衣

Fig. 10 Flexible exoskeleton robot assisted outerwear

2.3 驱动器的位置优化

驱动设备是外骨骼机器人整体结构的关键组成部分,且较重,刚性程度相对较高。通过合理设计驱动器在人体的位置,可以减小其对人体的压力,提升外骨骼机器人的可穿戴性能。2017 年,中科院深圳先进技术研究院研发了一款新型外骨骼机器人(见图 11)^[24]。该新型外骨骼机器人采用一种新的步态相位识别方法预估佩戴者的运动意图,实现与穿着者的协调运动。为避免设备整体结构过大,该机器人的电机驱动器采用分布式控制架构,并将所有的驱动单元整合置于背包中,从而获得体积更小、功能更全面的外骨骼机器人系统。2016 年,东南大学研发了一款用于步行辅助的外骨骼机器人(见图 12)^[25]。该系统的驱动电机设置在人体的腰部,可以降低运动惯量,提高人体活动的效率。

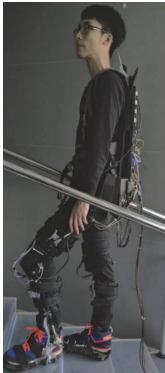


图 11 全身柔性外骨骼机器人

Fig. 11 Full-body flexible exoskeleton robot



图 12 步行辅助外骨骼机器人

Fig. 12 Walking-assisted exoskeleton robot

2.4 装置规格的可调节设计

对同一套外骨骼机器人系统而言,如果在使用过程中能够根据佩戴人群的体型调节尺寸,使不同穿着者均能获得较好的适体性,则可以提升其可穿戴性。2018 年,北京大艾机器人科技有限公司研发了一款可穿戴下肢外骨骼机器人艾动(见图 13)^[26],其通过自然的行走步态、真实的行走方式,

帮助脊髓损伤、脑损伤、中风、骨关节术后恢复患者重新学习正确的行走姿势,并锻炼患者的平衡及运动能力。该装置可在背部、大腿和小腿处大范围精准调节尺寸,且操作便利,可实现不同体型患者的精确快速适配。上海交通大学设计了新型混联增力式下肢外骨骼(见图 14)^[27]。该外骨骼遵循了穿戴者体型自动适应的设计要求,引入并联腿机构,舍弃了膝关节处的设计,只与穿戴者的髋关节与踝关节进行固定。该设计可以自动适应不同下肢长度穿戴者的需求。



图 13 艾动

Fig. 13 Ailegs

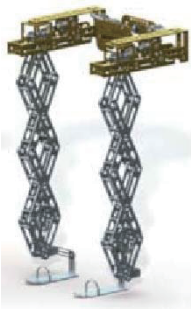


图 14 下肢外骨骼

Fig. 14 Lower limb exoskeleton

2.5 与人体骨肌系统的一体化设计

外骨骼机器人作为一种与人体相结合的穿戴型设备,在设计时可充分利用人体骨肌系统特点,以提升其可穿戴性能。

2014 年,洛克希德马丁公司开发了一款 FORTIS 无动力外骨骼系统(见图 15)^[28]。该系统在髋部、膝部和踝部设计了一系列的机械关节,巧妙地将负载从穿着者的身体直接传递到地面,从而减少人体所承受的设备重力,保证穿戴舒适性。该外骨骼系统可用于搬运重物,能有效提高生产效率,且在一定程度上预防使用者在工作中受伤。2017 年,深圳航天龙海特智能装备有限公司推出了一款无源护腰外骨骼系统(见图 16)^[29]。该系统将人体髋关节作为支撑,在其外部设置扭力关节;装置的

两端分别连接胸部和腿部形成力矩支撑,在穿着者完成弯腰或者前倾动作时,腰部受到的弯矩可以转换成胸部和大腿上的轻微压力,达到保护腰椎的目的。



图 15 FORTIS 外骨骼
Fig. 15 FORTIS exoskeleton



图 16 无源护腰外骨骼
Fig. 16 Passive waist protection exoskeleton

3 不足与展望

外骨骼机器人作为一种需要部分或者全部穿戴在人体上的可穿戴设备,其可穿戴性能会在不同程度上影响设备功能的发挥^[30]。目前,外骨骼机器人在可穿戴性方面的问题主要为携带不方便、操作复杂以及不够轻便等,已有不少研究者就其可穿戴性能的优化设计进行了多角度尝试,未来可以从以下 4 个方面就外骨骼机器人的可穿戴性能设计展开更为深入的研究和开发实践。

1)采用分体式结构设计方便穿脱。现有的外骨骼机器人大多采用一体化结构设计^[31],整体较笨重,个人往往无法独立完成穿戴,而分体式结构的设计能够提升装备穿脱的易操作性,甚至穿着者可独立完成穿脱。

2)采用轻量化设计降低人体载荷。在未来外骨骼机器人的设计中可以尽量遵循轻量、便捷化设计原则^[32],选择新型材料(如碳纤维复合材料)是

主要的技术手段之一^[33];整体或局部结构的精简也是有效的技术手段。轻量化设计可以同时提升人体穿戴的舒适性以及装备的易携带性。

3)采用柔性化设计提升人体活动灵活性。由于刚性外骨骼机器人设备笨重^[34],且存在与人体贴合性较差等问题,因此柔性化设计已经成为外骨骼机器人发展的主流趋势^[35]。在保证有效助力的基础上,可以引入弹性纺织品、弹簧以及类肌肉驱动器等结构部件,进一步提升外骨骼机器人的人机工效性,保证穿着者的活动灵活性。

4)采用可调整结构扩展适用性。不同的穿着者存在体型及其他个性特征的差异,外骨骼机器人作为一种可穿戴装置,需要具备可调节能力^[36],包括局部结构的位置调整,以及较大范围的尺寸缩放,以扩大外骨骼机器人的应用范围和穿着群体。

4 结 语

研究外骨骼机器人的可穿戴性能有助于推进其在康复医疗、军事作战、抢险救援等领域的应用。目前外骨骼机器人的灵活性和穿着舒适性仍有提升的空间,随着人类社会的进步和科技的飞速发展,今后外骨骼机器人定会朝着更加轻便化、智能化方向发展,并广泛应用于人类的生产和生活中,有效提升人们的生活质量。

参考文献：

[1] 沈雷, 桑盼盼. 不同领域技术下智能服装的发展现状及趋势[J]. 丝绸, 2019, 56(3): 45-53.
SHEN Lei, SANG Panpan. Research on development status and trend of smart clothing under technologies of different fields[J]. Journal of Silk, 2019, 56(3): 45-53. (in Chinese)
[2] 刘清清, 郭荣辉. 智能服装的应用及发展趋势[J]. 纺织科学与工程学报, 2019, 36(3): 102-108.
LIU Qingqing, GUO Ronghui. Application and development of intelligent garments [J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2019, 36(3): 102-108. (in Chinese)
[3] 张海焯, 黎淑婷, 韩丽屏, 等. 智能服装在军事领域的应用及研究进展[J]. 纺织导报, 2020(2): 73-76.
ZHANG Haixuan, LI Shuting, HAN Liping, et al. Application and research progress of intelligent apparel in military field[J]. China Textile Leader, 2020(2): 73-76. (in Chinese)
[4] 石晓博, 郭士杰, 李军强, 等. 发展中的外骨骼机器人及其关键技术[J]. 机床与液压, 2018, 46(21): 70-76, 140.

- SHI Xiaobo, GUO Shijie, LI Junqiang, et al. Developing exoskeleton robots and key technologies [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2018, 46(21): 70-76, 140. (in Chinese)
- [5] 周加永, 莫新民, 张昂, 等. 外骨骼助力机器人研究现状与关键技术分析[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(10): 99-104.
- ZHOU Jiayong, MO Xinmin, ZHANG Ang, et al. Analysis of exoskeleton assist robot research status and key technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(10): 99-104. (in Chinese)
- [6] 冯帅颀, 杨庭瑞, 崔启煜. 探究外骨骼技术在现代消防救援领域的应用[J]. 今日消防, 2020, 5(9): 14-16.
- FENG Shuaiqi, YANG Tingrui, CUI Qiyu. Explore the application of exoskeleton technology in modern fire rescue field[J]. Fire Protection Today, 2020, 5(9): 14-16. (in Chinese)
- [7] 杜世珍, 石萍, 王道雨, 等. 一种新型生物融合式腰椎外骨骼的设计及评估[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(3): 210-214, 221.
- DU Shizhen, SHI Ping, WANG Daoyu, et al. Design and evaluation of a novel biosynthetic lumbar exoskeleton[J]. Machine Design and Research, 2023, 39(3): 210-214, 221. (in Chinese)
- [8] 张树欣, 王景熙, 王建, 等. 力反馈式可穿戴上肢外骨骼遥操机器人设计及控制研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(6): 208-212, 218.
- ZHANG Shuxin, WANG Jingxi, WANG Jian, et al. Research on design and control scheme for wearable upper limb exoskeleton robot with force feedback in teleoperation system[J]. Automation and Instrumentation, 2023(6): 208-212, 218. (in Chinese)
- [9] 王东成. 矿用外骨骼机器人的驱动系统设计及研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [10] 冯雨果, 刘宇, 周晋. 可穿戴惯性传感器在全膝关节置换术后步态分析中的应用进展[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(6): 44-51.
- FENG Yuguo, LIU Yu, ZHOU Jin. A review of gait analysis after total knee arthroplasty using wearable inertial measurement sensors [J]. Leather Science and Engineering, 2023, 33(6): 44-51. (in Chinese)
- [11] 孟飞, 彭兴禹, 徐尤南. 下肢可穿戴外骨骼发展现状的分析与研究[J]. 机械传动, 2022, 46(10): 163-169.
- MENG Fei, PENG Xingyu, XU Younan. Analysis of and research on the development of lower limb wearable exoskeleton [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(10): 163-169. (in Chinese)
- [12] ESQUENAZI A, TALATY M, PACKEL A, et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury [J]. American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2012, 91(11): 911-921.
- [13] ASBECK A T, DE ROSSI S M M, HOLT K G, et al. A biologically inspired soft exosuit for walking assistance [J]. International Journal of Robotics Research, 2015, 34(6): 744-762.
- [14] 朱惠盈, 杨海乐, 林星羽. 外骨骼穿戴式助力助行机器人技术综述[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(7): 54-58, 63.
- ZHU Huiying, YANG Haile, LIN Xingyu. Review of exoskeleton wearable assisting robot [J]. Metrology and Measurement Technique, 2019, 46(7): 54-58, 63. (in Chinese)
- [15] WANG T M, PEI X, HOU T G, et al. An untethered cable-driven ankle exoskeleton with plantarflexion-dorsiflexion bidirectional movement assistance [J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2020, 21(5): 723-739.
- [16] 申京玉, 张仕民, 陈冲, 等. 无动力外骨骼助力机器人研究进展[J]. 机械传动, 2020, 44(2): 166-176.
- SHEN Jingyu, ZHANG Shimin, CHEN Chong, et al. Research progress of unpowered exoskeleton assist robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(2): 166-176. (in Chinese)
- [17] 关鑫宇, 季林红, 王人成. 无动力储能式截瘫助行外骨骼弹簧刚度优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1179-1184.
- GUAN Xinyu, JI Linhong, WANG Rencheng. Optimization of an unpowered energy-stored exoskeleton spring stiffness for spinal cord injuries [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(11): 1179-1184. (in Chinese)
- [18] 李强, 周加永, 赵文彬, 等. 无源被动外骨骼系统研究现状与关键技术分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(5): 156-161.
- LI Qiang, ZHOU Jiayong, ZHAO Wenbin, et al. Passive exoskeleton system research status and key technology analysis [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2021, 49(5): 156-161. (in Chinese)
- [19] 周伟杰, 韩亚丽, 朱松青, 等. 下肢外骨骼助力机器人的设计与跟随控制研究[J]. 现代制造工程, 2020(3): 47-53.
- ZHOU Weijie, HAN Yali, ZHU Songqing, et al. Research on design and follow-up control of lower extremity exoskeleton booster robot [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(3): 47-53. (in Chinese)
- [20] 刘建辉. 基于穿戴舒适性的下肢外骨骼机器人研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.

- [21] 于成涛,张静旖,吴英彪. 机器人轻量化材料应用的研究进展[J]. 新材料产业, 2019(12): 41-45.
YU Chengtao, ZHANG Jingyi, WU Yingbiao. Research progress on application of lightweight materials for robots [J]. Advanced Materials Industry, 2019(12): 41-45. (in Chinese)
- [22] PARK Y L, SANTOS J, GALLOWAY K G, et al. A soft wearable robotic device for active knee motions using flat pneumatic artificial muscles [C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong:IEEE, 2014: 4805-4810.
- [23] 张雷雨,贺彦东,李剑锋,等. 下肢柔性助力外衣的工效学设计与步态预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 1171-1184.
ZHANG Leiyu, HE Yandong, LI Jianfeng, et al. Ergonomic design of flexible lower limb assist exosuit and gait prediction [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(4): 1171-1184. (in Chinese)
- [24] CHEN C J, WU X Y, LIU D X, et al. Design and voluntary motion intention estimation of a novel wearable full-body flexible exoskeleton robot [J]. Mobile Information Systems, 2017, 2017: 1-11.
- [25] SHAN H, JIANG C, MAO Y L, et al. Design and control of a wearable active knee orthosis for walking assistance [C]//2016 IEEE 14th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). Auckland: IEEE, 2016: 51-56.
- [26] 李龙飞,朱凌云,荀向锋. 可穿戴下肢外骨骼康复机器人研究现状与发展趋势[J]. 医疗卫生装备, 2019, 40(12): 89-97.
LI Longfei, ZHU Lingyun, GOU Xiangfeng. Current status and development trend of wearable lower-limb exoskeleton rehabilitation robot [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2019, 40(12): 89-97. (in Chinese)
- [27] 缪云洁. 新型下肢外骨骼的机构性能设计方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [28] 佚名. 刚性还是柔性? 主动还是被动? 原来还有这些门道: 外军外骨骼装备发展路线(下) [EB/OL]. (2021-12-14) [2023-03-01]. https://www.sohu.com/a/508180675_120099885.
- [29] Simon. 国内研发腰椎助力装置的企业 [EB/OL]. (2022-05-12) [2023-03-01]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/121574098>.
- [30] 尹云雷,郭成,杨红英. 等. 电子织物在智能可穿戴领域的研究进展[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(1): 1-12.
YIN Yunlei, GUO Cheng, YANG Hongying, et al. Research progress of electronic fabrics in the intelligent wearable field [J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(1): 1-12. (in Chinese)
- [31] 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.
CHEN Andi, GAN Jing, QU Chuli, et al. Appearance design trend of dynamic exoskeleton robot [J]. Machinery, 2020, 47(9): 73-80. (in Chinese)
- [32] 刘政鑫. 傲鲨智能: 外骨骼机器人助力工业制造[J]. 机器人产业, 2023(1): 62-65.
LIU Zhengxin. ULS Robotics: exoskeleton robot helps industrial manufacturing [J]. Robot Industry, 2023(1): 62-65. (in Chinese)
- [33] 沈雷,孙浩. 智能可穿戴领域研究现状和发展趋势[J]. 服装学报, 2023, 8(2): 125-133.
SHEN Lei, SUN Tian. Intelligent wearable research status and its development trend [J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(2): 125-133. (in Chinese)
- [34] 韩稷钰,王衍鸿,万大千. 下肢外骨骼康复机器人的研究进展及发展趋势[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2022, 42(2): 241-246.
HAN Jiyu, WANG Yanhong, WAN Daqian. Research progress and development trend of lower extremity exoskeleton rehabilitation robot [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Medical Science), 2022, 42(2): 241-246. (in Chinese)
- [35] 岳欣琰,洪剑寒. 一堆结构可穿戴柔性传感器研究进展[J]. 现代纺织技术, 2024, 32(2): 27-39.
YUE Xinyan, HONG Jianhan. Research progress on wearable flexible sensors with one-dimensional structure [J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(2): 27-39. (in Chinese)
- [36] 曾城,许森,丁烨. 行走助力型下肢外骨骼机器人的设计与控制[J]. 机械与电子, 2022, 40(7): 69-74.
ZENG Cheng, XU Sen, DING Ye. Design and control of a lower limb exoskeleton robot [J]. Machinery and Electronics, 2022, 40(7): 69-74. (in Chinese)

(责任编辑:沈天琦)