·综 述·

# 上肢外骨骼机器人在偏瘫儿童中的研究进展

谢吉[1]，王景刚[2]，郭国情[1]，鲍家昕[1]，李庆云[2]，曹建国[2]

1. 深圳大学医学部，广东 深圳 518060；2. 深圳市儿童医院康复医学科

**摘 要：** 儿童偏瘫在脑损伤儿童中较为多见，主要表现为单侧肢体肌力下降、肌张力改变和感觉障碍，上肢症状常比下肢明显，延缓上肢发育和精细运动能力的获得。上肢外骨骼机器人是一种新型康复设备，可量化评估偏瘫儿童上肢功能并提供个性化的训练任务，作为传统康复治疗的补充方案，其在改善偏瘫儿童上肢功能障碍、提升生活质量方面展现出潜力。本文对上肢外骨骼机器人在偏瘫儿童上肢功能康复和评估中的研究现状展开综述，分析其在儿童偏瘫康复领域所面临的挑战，旨在为儿童上肢外骨骼机器人的技术研发与临床应用提供参考。

**关键词：** 上肢外骨骼机器人；偏瘫；上肢康复；儿童

**中图分类号：**R179 **文献标识码：**A **文章编号：**1008-6579(2026)08-0908-07 doi:10.11852/zgetbjzz2025-1472

## Application of upper limb exoskeleton robots in hemiplegic children

XIE Ji[1], WANG Jinggang[2], GUO Guoqing[1], BAO Jiaxin[1], LI Qingyun[2], CAO Jianguo[2]

*1. School of Medicine, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; 2. Department of Rehabilitation Medicine, Shenzhen Children's Hospital*

*Corresponding author: WANG Jinggang, E-mail: storm786@163.com*

**Abstract:** Hemiplegia is a prevalent complication among children with brain injuries, mainly characterized by unilateral limb muscle weakness, altered muscle tone, and sensory disturbances. Impairments in the upper extremity are typically more pronounced than those in the lower extremity, significantly delaying upper limb neurodevelopment and the acquisition of fine motor skills. Upper limb exoskeleton robots are a new type of rehabilitation equipment that can quantitatively assess upper limb function in hemiplegic children and provide personalized training tasks. As a supplementary approach to traditional rehabilitation therapy, robotic exoskeletons demonstrate substantial potential in improving upper limb dysfunction and enhancing the overall quality of life in children with hemiplegia. This review summarizes the current landscape of upper extremity robotic exoskeletons in the functional rehabilitation and clinical evaluation of pediatric hemiplegia, analyzes the existing challenges in pediatric populations, aiming to provide strategic insights for future technological development and clinical application in this domain.

**Keywords:** upper limb exoskeleton robot; hemiplegia; upper limb rehabilitation; children

偏瘫主要表现为单侧肢体的运动和协调障碍、感觉功能障碍，可伴有面舌肌等的运动障碍[1]。导致儿童偏瘫常见原因有颅脑外伤、脑性瘫痪（简称脑瘫）和颅内占位性疾病等，与成人偏瘫相比，儿童偏瘫的病理基础和预后更为复杂，康复过程以精细运动功能恢复最为困难，患儿常表现为上肢屈伸活动障碍和手指抓握困难[2]。运动体验的延迟和缺乏，不仅影响儿童早期认知发展，也对其后期日常生活活动能力和生活质量产生负面影响[3]。偏瘫儿童上肢康复需要长期、高强度的训练模式，传统康复治疗过于依赖医师和治疗师水平，在训练强度、重复性和客观评估方面存在局限性[4-5]。机器人辅助康复技术的出现，在节约人力医疗资源的同时可提供科学的个性化康复治疗方案，对于提高传统康复效果显示出巨大潜力[6-7]。近年，上肢康复机器人的应用趋势由末端牵引式康复机器人转向更贴合人体生理结构的外骨骼式机器人[8]。然而，目前多数外骨骼机器人主要针对成人设计，未能考虑儿童在生长发育、生理和心理等方面的特点。因此，开发适用于儿童的外骨骼机器人，并验证其在偏瘫儿童中的有效性和实用性是儿童机器人设计的研究热点与挑战[9]。本文介绍上肢外骨骼机器人的理论基础以及在偏瘫儿童康复中的研究进展，以期为国内儿童康复领域开展上肢外骨骼机器人技术提供参考。

**基金项目：**广东省医学科学技术研究基金项目（A2022421）；广东省高水平医院建设财政基金（ynkt2021-zz036）

**作者简介：**谢吉（2002—），女，硕士研究生，主要研究方向为儿童康复。

**通信作者：**王景刚，E-mail：storm786@163.com

## 1　上肢外骨骼机器人技术

1.1　上肢外骨骼机器人的康复理论基础　外骨骼机器人是一种可穿戴设备，其根据人体生理结构设计，在康复、工业和军事等领域应用前景广阔[10]。上肢外骨骼机器人通常具有多个关节自由度（degrees of freedom，DoF），可模拟或强化人体自然运动，旨在为使用者提供机械支持与辅助，改善患者肢体功能障碍[11-12]。

人体上肢系统是由骨性结构、关节连接和肌肉组织构成的精密运动链。上肢关节分为肩关节、肘关节、腕关节、掌指关节及指间关节，更是承担着上肢运动的核心功能：肩关节作为人类活动范围最大的球窝关节，其瞬时旋转重心随上肢活动呈动态变化，儿童处于肢体发育阶段，关节结构与成人存在显著差异，这要求外骨骼的肩部执行器需基于儿童人体测量数据设计复杂动态匹配模型，避免产生过度或目标不当的接触力及力矩，导致穿戴者不适或继发性损伤[13]；肘关节需实现屈曲-伸展和旋前-旋后运动；腕关节包含屈曲、尺桡偏和环转运动[14]；指间关节则掌管抓、握、捏等手指精细运动功能。上肢外骨骼机器人需具备与人体生理相匹配的关节轴，辅助上肢实施多个 DoF 的复合康复训练，借助神经可塑性、运动学习和运动控制机制[15-16]，促进肌肉力量、肌张力、运动范围和姿势控制等能力恢复[17]。在保证运动舒适性与安全性的基础上，可对非核心功能关节适当简化，以降低设备重量和成本。早期定制设备尺寸依据单个患者的上肢数据及体重比例设计，虽采用机械限位装置和电气保护系统保障整体安全性，配备急停按钮，但成本昂贵，急停触发依赖儿童的认知水平，且后期因无法适配青春期体型导致康复中断[18]，不仅降低康复效果，还可能因过度峰值力或运动限制，对幼儿发育中的肢体造成二次伤害[19]。目前在研及已上市的外骨骼机器人针对儿童快速生长发育的特点，主要通过可调节设计、软体机器人技术以及智能控制算法来确保外骨骼的长期适配性，使用模块化、可伸缩或更换的结构适应不同年龄段患儿关节轴线对齐和人机交互[20-21]，部分刚性、可调节外骨骼已进入市场应用，但以下肢为主，软体、自适应等前沿技术大多处于实验室阶段[22]。此外，患者主动配合是康复成功的关键，由于认知水平不足，外骨骼难以在低龄儿童群体中进行实验和应用，青春期逆反心理也可能使康复进程不理想。

1.2　上肢外骨骼机器人分类　根据上肢外骨骼机器人的应用领域，可分为康复外骨骼和辅助外骨骼[7]。康复外骨骼是一种医疗设备，主要用于临床环境中，目的是通过大量、重复、特定任务导向的训练重建或恢复运动功能；辅助外骨骼是一种辅助设备，旨在补偿已经丧失的功能，帮助有永久性功能障碍的用户完成日常生活活动（activities of daily living，ADL），提高生活质量[23]。

根据上肢外骨骼机器人的机械结构，可分为刚性外骨骼和软体外骨骼。见表 1。刚性外骨骼可支撑肢体的全部重量，通常具有高抗形变能力和紧凑性，并提供一定的机械灵活性，协助肢体活动，适用于上肢肌力较弱、需要较强支撑的偏瘫儿童；软体外骨骼符合人体非线性，无需精确对齐关节，在上肢中主要应用于手部，舒适度较高[24-25]。也有学者探索在刚性外骨骼机器人的某些特性中结合软体外骨骼结构，兼顾支撑性和灵活性[26]。根据上肢外骨骼机器人的驱动方式，可分为主动式和被动式[27]。主动外骨骼利用电机、气动和液压等执行元件，可根据预设程序或实时反馈主动驱动肢体运动，适合上肢主动运动能力差的偏瘫儿童；被动外骨骼则多采用弹簧系统或弹性组件，无需外部动力即可完成辅助任务，适合有一定自主活动能力的患者[28]。

## 2　上肢外骨骼机器人在偏瘫儿童康复中的应用进展

2014 年前后，首款面向儿童的 3D 打印肌电仿生臂研发成功，标志着儿童上肢外骨骼领域的初步探索。迄今多项研究证实，上肢外骨骼机器人不仅能够有效改善偏瘫儿童的上肢功能和双手协调能力，还能提高患者综合运动水平，缩短患儿住院周期，适合临床推广。Beretta 等[29]比较了物理治疗、强制性诱导运动疗法和 Armeo® Spring 外骨骼机器人辅助疗法在获得性脑损伤致偏瘫的儿童上肢康复中的效果，结果表明外骨骼机器人可在垂直取物等任务中减少肩部代偿，具有明确的任务特异性优势，尤其可作为中重度上肢功能障碍儿童的过渡康复方案。Urendes 等[30]研发了一种 3D 打印的被动上肢外骨骼，并在 7 名脑瘫儿童中应用。结果显示患者关节活动度增大，手部路径比也得到改善，证明该设备对改善儿童的 ADL 具有积极作用。Atkinson 等[31]将 Armeo® Spring 外骨骼机器人用于癌症患儿肢体康复，初步数据显示上肢活动度、肌力、ADL 及生活质量均有改善，为肿瘤引起的儿童偏瘫上肢康复提供支持证据，但该研究样本量小，数据分析不足，未来需要进一步验证。瑞士一项纳入 9 例偏瘫儿童的横断面研究评估了可穿戴儿童手部外骨

**表 1** 儿童上肢外骨骼设备参数对比

**Tab. 1** Parameter comparison of pediatric upper limb exoskeletons

| 机器人名称 | 设计类型 | 驱动方式 | 适用年龄段 | 自由度 | 核心功能效果 | 成本 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Armeo® Spring | 刚性 | 被动 | 4～18 岁 | 5 DoF，覆盖肩、肘等主要关节 | 改善上肢运动质量 | 高 |
| PEXO | 软体 | 主动 | 6～12 岁 | 手指、拇指独立驱动 | 实现侧向捏、指尖捏等基础手部动作 | 未商业化 |
| WREX | 刚性 | 被动 | 全龄儿童 | 4 DoF，肩肘多方向运动 | 提升肩肘关节活动度 | 高 |
| Playskin Lift™ | 软体 | 被动 | 3 岁以下婴幼儿 | 2 DoF | 辅助婴幼儿肩关节屈曲，扩大游戏互动空间 | 极低（＜30 美元） |
| Playskin Air™ | 软体 | 主动 | 全龄儿童 | 核心辅助肩关节外展 | 显著提升肩关节外展关节活动度 | 中 |
| Kinarm | 刚性 | 主动 | 6～19 岁 | 2 DoF，肩、肘关节水平平面 | 量化位置觉与伸手动作功能 | 高 |
| ChARMin | 刚性 | 主动 | 5～18 岁 | 6 DoF | 多维度评估，可靠性高 | 高 |

注：三维上肢多关节训练与评估系统（Armeo® Spring upper limb rehabilitation exoskeleton，Armeo® Spring）；儿童主动驱动全手外骨骼系统（PEXO pediatric hand rehabilitation exoskeleton，PEXO）；威尔明顿机器人上肢外骨骼（Wilmington robotic exoskeleton，WREX）；上肢助力柔性外骨骼服饰（Playskin Lift™ exoskeletal assistive garment，Playskin Lift™）；儿童气动柔性上肢外骨骼服饰（soft pneumatic upper limb exoskeleton，Playskin Air™）；运动学上肢机器人外骨骼（kinesiological instrument for normal and altered reaching movement，Kinarm）；苏黎世 ChARMin 儿童上肢康复外骨骼（ChARMin pediatric actuated upper limb exoskeleton，ChARMin）。

骼（PEXO）的有效性，发现使用 PEXO 时，参与者的辅助手评定量表（assisting hand assessment，AHA）中位评分提高，差异有统计学意义（$P=0.035$），证实 PEXO 能显著改善患者的双手表现，但在腕关节灵活度、穿戴方便性及材料透气性方面仍需改进[32]。

河南省儿童医院纳入 23 名偏瘫患儿进行研究，结果显示经 Armeo® Spring Pediatric 机器人训练后，治疗组的 Peabody 精细运动评估量表和儿童功能独立性评定评分较对照组提高[33]。娄欣霞等[34]发现儿童上肢康复机器人联合电子生物反馈治疗脑损伤致偏瘫患儿，可改善其临床症状和神经行为，提示多模态康复治疗可能具有协同效应，为偏瘫儿童康复治疗方案的制定提供了新思路。一篇基于国际功能、残疾和健康分类（儿童和青少年版）（International Classification of Functioning, Disability and Health for Children and Youth，ICF-CY）框架的系统综述分析了机器人辅助疗法对脑瘫儿童上肢功能的有效性，认为现有研究存在样本量小、外骨骼机器人型号差异大、测量工具不一致和缺乏长期随访数据等问题，未来应在严格遵循 ICF-CY 框架的基础上，优化研究设计、规范干预方案、探索机器人长期疗效和安全性，拓展应用场景[35]。

总体而言，儿童上肢外骨骼机器人处于迅速发展阶段，但不同研究的样本量、设备型号及评估标准存在差异。国外研究起步较早，设备研发与临床应用探索更为丰富，但多聚焦于特定病因或年龄段儿童，且部分研究样本量有限；国内研究起步较晚，虽紧密结合本土医疗实际，但样本量相对较少，设备自主研发与长期疗效追踪方面不足。

## 3 机器人技术在偏瘫儿童上肢功能评估中的可靠性

精准的功能评估是外骨骼机器人实现人机协同的关键。机器人技术为量化评估偏瘫儿童上肢功能提供了客观、精确的工具，有助于捕捉难以察觉的细微功能变化，但其可靠性仍需进一步验证[36]。Francisco-Martínez 等[37]开发了基于 Kinect v2 传感器的系统，用于评估痉挛性偏瘫儿童的主动关节活动度，结果显示，该系统测量的角度与使用通用量角器测量的结果差异无统计学意义（$P<0.05$），证明了其作为一种非接触式评估工具的有效性。在多功能同步训练中，机器人评估的优势是实时监测、多维度数据采集以及动态调整[38]。一项纳入 48 名围生期缺血性卒中患儿的前瞻性研究利用 Kinarm 外骨骼机器人评估了上肢位置感与到达能力，发现这两项功能缺陷相对独立，且与临床量表的关联较弱，分析二者弱关联的原因在于临床量表本身的局限性和机器人与临床评估测量的核心维度不同：与机器人等客观测量工具相比，临床量表多为定性或半定量评分，侧重评估日常功能相关的整体感觉/运动能力，难以同时覆盖感觉-运动的多维度离散特征，指导制定康复策略可能缺乏针对性，且易受人为偏倚影响，可能缺乏可靠性和敏感性；Kinarm 机器人设置了手臂位置匹配任务和视觉引导到达任务共 8 个独立参数，分别从位置感知的精准度、空间认知，以及运动的反应、方向、速度、完成时间等多维度量化上肢功能，可捕捉临床评估难以察觉的细微功能变化，精准定位缺陷模块，为“个性化康复”提供数据支撑[39]。另一项纳入 30 名脑损伤儿童的研究评估了 ChARMin 外骨骼机器人评估的测试-重测信度，结果显示，在重复进行的评估中，主动和被动关节活动度、力量、运动质量等多个参数的组内相关系数从低

到高不等，且存在系统误差，表明日常表现的随机变异可能影响评估的可靠性[40]。未来可通过标准化评估流程、多模态评估融合、优化设备性能以及长期数据收集等措施校准日常短期随机变异带来的偏差，实现评估可靠性的提升。

## 4　儿童上肢外骨骼的设计趋势与挑战

当前儿童上肢外骨骼的设计日益关注经济性、轻量化、安全性、可调节性以及用户的可接受度，仍面临一系列技术和材料上的调整与挑战。可能存在设备价格昂贵、与儿童的个性化需求不匹配、心理依从性不足及临床康复日程紧张等问题。

降低成本、提高普及性，是所有康复机器人设计面临的首要挑战。外骨骼式机器人普遍重量和体积偏大，价格昂贵，导致目前研究场所大多局限于康复中心或实验室，难以评估此类机器人在室外环境中的应用效果，也阻碍了需要许多设备的大组研究的开展。新兴材料的开发和应用实现了机器人的轻量化和便携化。3D 打印材料具有快速成型、个性化定制的优势，可根据儿童肢体尺寸与康复需求灵活调整设备结构，且生产成本相对较低，有望实现家庭化的外骨骼机器人生产[41-42]；形状记忆合金、硅胶以及基于纺织材料的驱动器也逐步应用于部分软体外骨骼系统[28, 43]。提高人机兼容性、获取人类意图是上肢外骨骼主动控制的关键挑战。传统机器人多用串联式刚性结构，因驱动装置与执行装置位置较近，难以避免与人体产生接触力，造成冲击损伤。模块化设计将外骨骼拆解成可自由组合的组件，既适配儿童的生长和个性化需求，又降低了研发、维护和使用成本，已成为儿科康复设备的重要设计趋势[44]。李文霞等[45]设计的刚柔耦合串并联机械臂在大臂和小臂处设计了可调余量为 30 mm 的长度调节机构，初步证实可满足不同体型的患者。美国特拉华大学设计的 Playskin Air™全软性主动气动上肢外骨骼改良传统 WREX 的硬质设计，采用气动气囊为执行器，可由用户自主充放气，兼顾功能、美观和易用性[22]。基于传感器的自适应外骨骼机器人根据实时反馈提供精准辅助，有助于推动更高效的康复进程[46-47]。典型的外骨骼辅助运动识别策略即肌电控制策略，优化了传统康复机器人主要采用的预编程轨迹或力辅助模式，其表面肌电传感器通过捕捉极微弱的肌电信号，使得偏瘫儿童极早期康复训练的开展成为可能。但肌电信号个体差异大，易受电极片粘贴位置影响[48-49]。脑机接口集成外骨骼机器人通过对特定区域初级感觉、运动皮层的激活，改善偏瘫患儿的生活质量，但脑电信号检测需要保持精力集中，且信噪比较低，对患儿的认知水平有一定要求[50-51]。因此，学者认为多模态混合式运动识别协同互补，是提高运动识别精确性的有效途径[48]。此外，开展家庭康复可以缓解临床康复的紧张日程、提高儿童心理依从性，但调查显示，目前外骨骼康复机器人存在限制地面活动、外观设计单一、与育儿工具不兼容等问题[52]。鉴于日常生活需求以及家庭康复对外骨骼机器人舒适和美观程度的要求，需从实际使用场景出发，优化设备结构与外观设计。有研究分析了 58 项用于儿童的机器人设备，指出其设计的关键因素应包括重量、安全性、可操作性和激励性[9]。McCall 等[53]开发了针对脑瘫致偏瘫儿童手指分离动作训练与评估的康复平台，配合气动驱动手套和虚拟现实键盘使用，可以初步检验远程康复的训练成效。

## 5　未来研究建议和方向

上肢外骨骼机器人对偏瘫儿童的干预尚处于起步阶段，尽管技术突破推动其往轻量化、智能化、成长适配化方向发展，但临床研究普遍样本量小，对室外环境应用的关注度不足，使得外骨骼机器人对改善偏瘫儿童日常生活的有效性仍存在争议。未来发展应聚焦于以下方面：1）促进机器人开发机构和康复中心之间的合作，培养机器人-康复医疗复合型人才，设计更符合人体生理结构的外骨骼机器人，同时改进材料和设计方法降低机器人成本并减少后续维护费用。2）改良机构设计和人工智能算法，实现基于患者意图和表现的自适应辅助，满足个性化需求。3）基于 ICF-CY 框架，开展评估工具的标准化研究，确定偏瘫儿童中最具可靠性的机器人评估参数，推动评估方法的标准化。4）目前外骨骼机器人的应用研究多为个案研究和案例研究[3]，设计、实施高质量的随机对照试验并进行长期随访，有助于评估其在改善病情、ADL 和生活质量方面的长期效果。5）分析在不同场景下影响儿童参与度和家庭满意度的因素。

儿童偏瘫病因多样、病理基础和预后复杂，尤以精细运动功能的恢复最为困难。设计良好的上肢外骨骼康复机器人可提供客观的评估参数和个性化的训练任务，是传统康复治疗方法的有效补充。然而，当前外骨骼机器人发展仍不成熟，基于儿童设计和应用的类型较为少见。近年国内关于儿童上肢外骨骼机器人的研发开始受到关注，但真正应用于临床的报道有限；国外研究样本量较小，病因较单一。未

来应加强适合偏瘫儿童的上肢外骨骼机器人的研究和应用。相信随着技术优化和临床验证的不断深入，上肢外骨骼机器人有望为偏瘫儿童康复提供更具有普适性的新型辅助治疗方案。

**利益冲突声明** 本文不存在利益冲突

**数据可用性声明** 本研究未生成新的数据，对于纳入的每项研究均已在参考文献列表中列出。

## 参考文献

[1] 周天添，张通，张琦，等. Lokomat 机器人辅助步行训练对偏瘫儿童下肢运动功能的效果[J]. 中国康复理论与实践，2025，31(6)：711-720.
Zhou TT，Zhang T，Zhang Q，et al. Effect of Lokomat robotic-assisted gait training on lower limb motor function in children with hemiplegia[J]. Chin J Rehabil Theory Pract，2025，31(6)：711-720. (in Chinese)

[2] 陈艺，贠国俊，王景刚，等. 偏瘫儿童 108 例临床特点及精细功能预后分析[J]. 中国儿童保健杂志，2023，31(8)：899-903.
Chen Y，Yun GJ，Wang JG，et al. Clinical characteristics and prognosis of fine motor function in 108 children with hemiplegia[J]. Chin J Child Health Care，2023，31(8)：899-903. (in Chinese)

[3] Li B，Cunha AB，Lobo MA. Effectiveness andusers′ perceptions of upper extremity exoskeletons and robot-assisted devices in children with physical disabilities：Systematic review[J]. Phys Occup Ther Pediatr，2024，44(3)：336-379.

[4] Dalla Gasperina S，Roveda L，Pedrocchi A，et al. Review onpatient-cooperative control strategies for upper-limb rehabilitation exoskeletons[J]. Front Robot AI，2021，8：745018.

[5] 胡恒心，于旭东. 智能上肢外骨骼机器人研究进展与展望[J]. 人工智能，2023，6：43-58.
Hu HX，Yu XD. Research progress and prospect of intelligent upper limb exoskeleton robots[J]. Artif Intell，2023，6：43-58. (in Chinese)

[6] Moulaei K，Bahaadinbeigy K，Haghdoostd AA，et al. Overview of the role of robots in upper limb disabilities rehabilitation：A scoping review[J]. Arch Public Health，2023，81(1)：84.

[7] 龚兴若，孔亚敏，马丙祥. 上肢外骨骼机器人在儿童脑性瘫痪中的研究和应用进展[J]. 中国康复医学杂志，2024，39(3)：436-442.
Gong XR，Kong YM，Ma BX. Research and application progress of upper limb exoskeleton robots in children with cerebral palsy[J]. Chin J Rehabil Med，2024，39(3)：436-442. (in Chinese)

[8] 郑蓉，蒋林，李琴，等. 上肢康复机器人在儿童脑性瘫痪中的应用及研究进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文)，2025，6(8)：1348-1353.
Zheng R，Jiang L，Li Q，et al. Application and research progress of upper limb rehabilitation robot in children with cerebral palsy[J]. Chin J Rob Surg，2025，6(8)：1348-1353. (in Chinese)

[9] Gonzalez A，Garcia L，Kilby J，et al. Robotic devices for paediatric rehabilitation：A review of design features[J]. BioMedical Eng OnLine，2021，20(1)：89.

[10] 李靖，曹民. 外骨骼上肢康复机器人的运动学研究与验证[J]. 机械传动，2018，42(11)：89-95.
Li J，Cao M. Kinematics research and verification of exoskeleton robot for upper limb rehabilitative[J]. J Mech Transm，2018，42(11)：89-95. (in Chinese)

[11] Vallée A. Exoskeleton technology in nursing practice：Assessing effectiveness，usability，and impact on nurses′ quality of work life，a narrative review[J]. BMC Nurs，2024，23(1)：156.

[12] 侍伟伟，靳令经. 末端牵引式与外骨骼式上肢康复机器人研究进展与临床应用[J]. 外科研究与新技术(中英文)，2025，14(2)：101-106.
Shi WW，Jin LJ. Review on research development and clinical application of terminal traction and exoskeleton upper limb rehabilitation robots[J]. Surg Res New Tech，2025，14(2)：101-106. (in Chinese)

[13] Ayazi M，Sahin I，Mucchiani C，et al. Analysis offorces exerted by shoulder and elbow fabric-based pneumatic actuators for pediatric exosuits[C]//2025 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Chicago，IL，USA. IEEE，2025：958-963.

[14] Rainbow MJ，Wolff AL，Crisco JJ，et al. Functional kinematics of the wrist[J]. J Hand Surg Eur Vol，2016，41(1)：7-21.

[15] 杨婷婷，李鑫，俞鑫璐，等. 上肢康复机器人在脑性瘫痪儿童康复中的研究进展[J]. 中国康复医学杂志，2022，37(12)：1717-1721.
Yang TT，Li X，Yu XL，et al. Research progress of upper limb rehabilitation robots in the rehabilitation of children with cerebral palsy[J]. Chin J Rehabil Med，2022，37(12)：1717-1721. (in Chinese)

[16] Di Marco R，Rubega M，Lennon O，et al. Experimental protocol to assess neuromuscular plasticity induced by an exoskeleton training session[J]. Meth Protoc，2021，4(3)：48.

[17] Molteni F，Gasperini G，Cannaviello G，et al. Exoskeleton and end-effector robots for upper and lower limbs rehabilitation：Narrative review[J]. PM&R，2018，10(Suppl 9)：174-188.

[18] López NM，de Diego N，Hernández R，et al. Customized device for pediatric upper limb rehabilitation in obstetric brachial palsy[J]. Am J Phys Med Rehabil，2014，93(3)：263-266.

[19] 汪宗保，汪宗兵，杨永晖，等. 上肢康复可穿戴式外骨骼助力机器人的机械设计与研究[J]. 中国医疗器械杂志，2022，46(1)：42-46.
Wang ZB，Wang ZB，Yang YH，et al. Mechanical design and research of wearable exoskeleton assisted robot for upper limb rehabilitation[J]. Chin J Med Lnstrumentation，2022，46(1)：42-46. (in Chinese)

[20] Massardi S, Rodriguez-Cianca D, Pinto-Fernandez D, et al. Characterization andevaluation of human-exoskeleton interaction dynamics: A review[J]. Sensors, 2022, 22(11): 3993.

[21] 杜佳乐，张卫锋，王晖，等. 外骨骼上肢康复机器人动力学分析与仿真研究[J]. 机械制造与自动化，2025，54(1)：135-142.
Du JL, Zhang WF, Wang H, et al. Dynamic analysis and simulation research of exoskeleton upper limb rehabilitation robot[J]. Mach Build Autom, 2025, 54(1): 135-142. (in Chinese)

[22] Li B, Baraldi Cunha A, Kriner SM, et al. Playskin Air™: A pediatric pneumatic exoskeleton for children with upper extremity disabilities[C]//Proceedings of the 2022 ACM International Symposium on Wearable Computers. Cambridge United Kingdom. ACM, 2022: 123-126.

[23] Dupont PE, Nelson BJ, Goldfarb M, et al. A decade retrospective of medical robotics research from 2010 to 2020[J]. Sci Robot, 2021, 6(60): eabi8017.

[24] Maldonado-Mejía JC, Múnera M, Diaz CAR, et al. A fabric-based soft hand exoskeleton for assistance:The ExHand Exoskeleton[J]. Front Neurorobot, 2023, 17: 1091827.

[25] Ko MJ, Chuang YC, Ou-Yang LJ, et al. The application of soft robotic gloves in stroke patients: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Brain Sci, 2023, 13(6): 900.

[26] Vélez-Guerrero MA, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Artificial intelligence-based wearable robotic exoskeletons for upper limb rehabilitation: A review[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2146.

[27] Gandolfi M, Valè N, Posteraro F, et al. State of the art and challenges for the classification of studies on electromechanical and robotic devices in neurorehabilitation: A scoping review[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2021, 57(5): 831-840.

[28] Preethichandra DMG, Piyathilaka L, Sul JH, et al. Passive and active exoskeleton solutions: Sensors, actuators, applications, and recent trends[J]. Sensors, 2024, 24(21): 7095.

[29] Beretta E, Cesareo A, Biffi E, et al. Rehabilitation of upper limb in children with acquired brain injury: A preliminary comparative study[J]. J Healthc Eng, 2018, 2018: 4208492.

[30] Urendes E, Sánchez C, Lerma-Lara S, et al. Design, development, and functional validation of a 3D-printed passive upper limb exoskeleton[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2024, 32: 2503-2512.

[31] Atkinson M, Tully A, Maher CA, et al. Safety, feasibility and efficacy of lokomat® and Armeo® Spring training in deconditioned paediatric, adolescent and young adult cancer patients[J]. Cancers, 2023, 15(4): 1250.

[32] Lieber J, Dittli J, Lambercy O, et al. Clinical utility of a pediatric hand exoskeleton: Identifying users, practicability, and acceptance, and recommendations for design improvement[J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2022, 19(1): 17.

[33] 岳草，常笑冰，尚清，等. 上肢康复机器人训练对脑性瘫痪患儿上肢功能恢复的影响[J]. 中国医学工程，2018，26(11)：89-91.
Yue C, Chang XB, Shang Q, et al. Effect of upper limb rehabilitation robot training on upper limb functional recovery of children with cerebral palsy[J]. China Med Eng, 2018, 26(11): 89-91. (in Chinese)

[34] 娄欣霞，尚清，娄普，等. 机器人联合电子生物反馈对脑损伤患儿康复的影响[J]. 中国实用神经疾病杂志，2017，20(21)：100-102.
Lou XX, Shang Q, Lou P, et al. Effect of robot joint electronic biofeedback to brain damage in children[J]. Chin J Pract Nerv Dis, 2017, 20(21): 100-102. (in Chinese)

[35] Sung-U S, Nisa BU, Yotsumoto K, et al. Effectiveness of robotic-assisted therapy for upper extremity function in children and adolescents with cerebral palsy: A systematic review protocol[J]. BMJ Open, 2021, 11(5): e045051.

[36] Decraene L, Orban de Xivry JJ, Kleeren L, et al. In-depth quantification of bimanual coordination using the Kinarm exoskeleton robot in children with unilateral cerebral palsy[J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2023, 20(1): 154.

[37] Francisco-Martínez C, Padilla-Medina JA, Prado-Olivarez J, et al. Kinect v2-assisted semi-automated method to assess upper limb motor performance in children[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2258.

[38] 吴群，支振豪，邹宁. 智能康复设备中的人机协同新视角[J]. 中国康复医学杂志，2025，40(1)：144-152.
Wu Q, Zhi ZH, Zou N. New perspective of human-machine collaboration in intelligent rehabilitation equipment[J]. Chin J Rehabil Med, 2025, 40(1): 144-152. (in Chinese)

[39] Kuczynski AM, Kirton A, Semrau JA, et al. Relative independence of upper limb position sense and reaching in children with hemiparetic perinatal stroke[J]. J NeuroEngineering Rehabil, 2021, 18(1): 80.

[40] Graser JV, Prospero L, Liesch M, et al. Test-retest reliability of upper limb robotic exoskeleton assessments in children and youths with brain lesions[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 16685.

[41] Minamii K, Yoshikawa M. Ahand exoskeleton with 3D-printed compliant mechanisms to assist grasping[C]//2024 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Orlando, FL, USA. IEEE, 2024: 1-4.

[42] Sanchez C, Blanco L, Del Río C, et al. A 3D-printed passive exoskeleton for upper limb assistance in children with motor disorders: Proof of concept through an electromyography-based assessment[J]. Peer J, 2023, 11: e15095.

[43] 秦学，侯瑞麟，范颖豪，等. 基于 SMA 的腕部外骨骼设计及其内外旋运动机理分析[J]. 现代制造工程，2025(9)：66-72.
Qin X, Hou RL, Fan YH, et al. SMA-based wrist exo-

skeleton design and its internal and external rotation movement mechanism analysis[J]. Mod Manuf Eng, 2025(9): 66-72. (in Chinese)

[44] 崔祯，赵志刚，苏程，等. 绳牵引分层驱动上肢康复机器人康复训练安全性评估[J]. 机器人. doi:10.13973/j.cnki.robot.250079.
Cui Z, Zhao ZG, Su C, et al. Safety evaluation of rehabilitation training for rope-traction hierarchically driven upper limb rehabilitation robot[J]. Robot. doi:10.13973/j.cnki.robot.250079. (in Chinese)

[45] 李文霞，赵志刚，赵祥堂，等. 刚柔耦合串并联康复机械臂运动特性分析[J]. 机械强度，2024，46(4)：952-958.
Li WX, Zhao ZG, Zhao XT, et al. Kinematic characteristics analysis of rigid-flexible coupling series-parallel rehabilitation manipulator[J]. J Mech Strength, 2024, 46(4): 952-958. (in Chinese)

[46] Bardi E, Gandolla M, Braghin F, et al. Upper limb soft robotic wearable devices: A systematic review[J]. J Neuro-Engineering Rehabil, 2022, 19(1): 87.

[47] Gaudet G, Raison M, Achiche S. Currenttrends and challenges in pediatric access to sensorless and sensor-based upper limb exoskeletons[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3561.

[48] 王玉金，聂子芸，罗梦霞，等. 手功能康复机器人及其运动意图识别研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2025，39(5)：156-162.
Wang YJ, Nie ZY, Luo MX, et al. Research progress on hand functional rehabilitation robots and their motion intention recognition[J]. J Chongqing Univ Technol (Nat Sci), 2025, 39(5): 156-162. (in Chinese)

[49] Fu J, Choudhury R, Hosseini SM, et al. Myoelectric control systems for upper limb wearable robotic exoskeletons and exosuits - A systematic review[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8134.

[50] 杜娜，马媛，赵鑫. 脑机接口集成外骨骼机器人在康复领域中的应用综述[J]. 医疗卫生装备，2025，46(7)：99-108.
Du N, Ma Y, Zhao X. Review of application of brain-computer interface integrated exoskeleton robot in field of rehabilitation[J]. Chin Med Equip J, 2025, 46(7): 99-108. (in Chinese)

[51] 卢振利，王乾，王红，等. 基于脑机接口的机器人辅助脑瘫康复面部表情训练系统设计[J]. 高技术通讯，2023，33(4)：419-427.
Lu ZL, Wang Q, Wang H, et al. Design of a BCI-based robot assisted system for facial expression rehabilitation of CP[J]. Chin High Technol Lett, 2023, 33(4): 419-427. (in Chinese)

[52] Li B, Arcemont S, Lobo MA. Identification of users' needs for pediatric upper extremity exoskeletons[J]. Pediatr Phys Ther, 2024, 36(3): 329-336.

[53] McCall JV, Ludovice MC, Blaylock JA, et al. A platform for rehabilitation of finger individuation in children with hemiplegic cerebral palsy[J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot, 2019, 2019: 343-348.

**收稿日期**:2025-12-24 **修回日期**:2026-06-17 **本文编辑**:李少闻

(上接第 901 页)

Liu YJ, Wuyun GW, Shan YX, et al. A case study of intervention on social and emotional competence of children with ASD in inclusive education[J]. J Beijing Inst Educ, 2024, 38(3): 38-48. (in Chinese)

[13] Rice D, Barone SJr. Critical periods of vulnerability for the developing nervous system: Evidence from humans and animal models[J]. Environ Health Perspect, 2000, 108: 511-533.

[14] Zhao J, Zhang X, Lu Y, et al. Virtual reality technology enhances the cognitive and social communication of children with autism spectrum disorder[J]. Front Public Health, 2022, 10: 1029392.

[15] 关宏岩，童梅玲. 特殊需求儿童养育照护的多维支持系统[J]. 中国儿童保健杂志，2026，34(5)：478-484.
Guan HY, Tong ML. Multidimensional nurturing care support system for children with special needs[J]. Chin J Child Health Care, 2026, 34(5): 478-484. (in Chinese)

[16] Wong CS. A play and joint attention intervention for teachers of young children with autism: A randomized controlled pilot study[J]. Autism, 2013, 17(3): 340-357.

[17] 中国妇幼保健协会托幼机构儿童保健专业委员会，中国妇幼保健协会婴幼儿养育照护专业委员会，中国妇幼健康研究会婴幼儿养育照护专业委员会，等. 托育机构特殊健康需求婴幼儿养育照护专家共识[J]. 中国儿童保健杂志，2026，34(5)：465-472.
Child Health Care in Nursery Institutions Committee, Chinese Maternal and Child Health Association; Infants and Toddlers Nurturing Care Committee, Chinese Maternal and Child Health Association; Infants and Toddlers Nurturing Care Committee, Chinese Maternal and Child Health Research Association, et al. Expert consensus on the nurturing care of infants and young children with special health needs in nursery institutions[J]. Chin J Child Health Care, 2026, 34(5): 465-472. (in Chinese)

[18] Freeman SFN. Early childhood inclusion: Focus on change[J]. Am J Ment Retard, 2003, 108(6): 435-436.

[19] UNICEF, WHO. Nurturing care for children with developmental delays and disabilities: thematic brief[EB/OL]. (2026-03-02)[2026-03-26]. https://www.who.int/publications/i/item/B09617

**收稿日期**:2026-03-27 **修回日期**:2026-06-08 **本文编辑**:李少闻