

## 智能算法驱动的四肢康复辅助设备建模与优化研究

周云舒, 王继宏, 金美娟, 杨阳\*

南通理工学院健康医学院 江苏南通

**【摘要】**随着人口老龄化加剧及肢体功能障碍患者数量攀升,四肢康复辅助设备成为提升康复治疗效率的关键载体。智能算法的融入为设备的智能化升级提供了核心支撑,有效解决了传统设备适配性差、控制精度低等瓶颈。本文系统梳理了智能算法在四肢康复辅助设备模型构建与优化领域的研究进展,重点阐述了设备建模技术(运动学、动力学模型)的应用现状,分析了优化算法、控制算法、运动意图识别算法等核心智能算法的融合应用路径。为四肢康复辅助设备的智能化研发提供了清晰的研究脉络与技术参考,对推动康复医学与智能算法的深度融合具有重要意义。

**【关键词】**智能算法;四肢康复辅助设备;运动学建模;参数优化;康复控制

**【基金项目】**2023年度江苏高校哲学社会科学基金项目(2023SJYB1713):失能老人延续护理的社会支持体系研究;2023年江苏高校教育信息化研究课题(2023JSETKT132):基于虚拟仿真技术与共同叙事理念的老年护理学课程建设;2024年江苏省大学生创新创业训练项目(202412056059Y):智能四肢运动康复辅助设备

**【收稿日期】**2026年2月17日 **【出刊日期】**2026年3月31日 **【DOI】**10.12208/j.ijmd.20260020

### Research on modeling and optimization of limb rehabilitation assistive devices driven by intelligent algorithms

*Yunshu Zhou, Jihong Wang, Meijuan Jin, Yang Yang\**

*School of Health Sciences, Nantong University of Science and Technology, Nantong, Jiangsu*

**【Abstract】**With the growing aging population and the rising number of individuals with limb functional impairments, upper and lower limb rehabilitation assistive devices have emerged as critical tools for enhancing the efficacy of rehabilitation therapy. The integration of intelligent algorithms provides essential support for the intelligent advancement of these devices, effectively overcoming limitations such as poor adaptability and low control precision in conventional systems. This paper presents a systematic review of recent advances in intelligent algorithms applied to model construction and optimization in upper and lower limb rehabilitation assistive devices. It focuses on current methodologies in device modeling—particularly kinematic and dynamic modeling—and examines the integration and application of core intelligent algorithms, including optimization algorithms, control strategies, and motion intention recognition techniques. The study offers a structured research framework and technical reference for the intelligent development of rehabilitation assistive technologies, contributing significantly to the synergistic integration of rehabilitation medicine and intelligent computing.

**【Keywords】**Intelligent algorithms; Upper and lower limb rehabilitation assistive devices; Kinematic modeling; Parameter optimization; Rehabilitation control

#### 1 引言

全球人口老龄化进程加速,加之脑血管疾病、

脊髓损伤、外伤等因素的影响,肢体功能障碍患者群体持续扩大,对专业康复治疗的需求日益迫切<sup>[1]</sup>。

第一作者简介:周云舒,本科,研究方向:老年护理,智慧护理;

\*通讯作者:杨阳,硕士,研究方向:老年护理,智慧护理。

四肢康复作为恢复肢体运动功能的核心环节, 传统治疗模式高度依赖康复医师的人工指导, 存在资源分配不均、治疗效率低下、个性化适配不足等突出问题<sup>[2]</sup>。四肢康复辅助设备(如外骨骼机器人、康复训练仪、智能矫形器等)的出现, 能够有效减轻医师工作负担, 保障康复训练的规范性与持续性, 成为康复医学领域的研究热点<sup>[3]</sup>。

然而, 传统四肢康复辅助设备多采用固定轨迹控制策略, 缺乏对患者个体差异(体型、运动能力、康复阶段)的动态适配能力, 且无法实时感知患者运动状态并调整辅助策略, 不仅限制了康复效果, 还可能因辅助不当造成二次伤害<sup>[4]</sup>。随着人工智能技术的快速发展, 智能算法(如优化算法、模糊控制算法、深度学习算法等)为康复辅助设备的智能化升级提供了核心技术支撑, 通过融合传感器技术与运动学建模, 实现设备与人体运动的精准协同, 成为提升康复设备性能的关键路径<sup>[5]</sup>。

当前, 智能算法在四肢康复辅助设备模型构建与优化领域的研究成果日益丰富, 但相关研究分散于不同技术方向, 缺乏系统的梳理与总结。本文旨在全面梳理该领域的研究进展, 明确核心技术路线与应用瓶颈, 为后续研究提供清晰的学术脉络。同时, 通过分析智能算法与康复设备的融合逻辑, 为提升设备适配性、控制精度及康复效果提供技术参考, 推动康复辅助设备向个性化、智能化、临床化方向发展, 具有重要的理论意义与临床应用价值。

## 2 四肢康复辅助设备建模技术研究进展

模型构建是康复辅助设备实现精准控制的基础, 其核心目标是精准表征人体四肢运动规律与设备机械结构的协同关系<sup>[6]</sup>。目前, 四肢康复辅助设备的建模技术主要围绕运动学模型与动力学模型展开, 两者分别从几何关系与力学特性两个维度为设备优化提供理论支撑。

### 2.1 运动学建模技术

运动学建模旨在描述人体四肢关节与设备执行机构的几何运动关系, 不考虑运动过程中的受力情况, 是实现设备轨迹规划的核心基础<sup>[7]</sup>。当前, D-H参数法是四肢康复辅助设备运动学建模的主流方法, 该方法通过建立连杆坐标系, 用连杆长度、连杆扭角、关节偏距、关节角度四个参数描述相邻连杆的相对位置与姿态, 通过齐次变换矩阵实现关节运动的数学表征<sup>[8]</sup>。

在上肢康复设备建模中, 研究者多采用 D-H 参数法构建上臂、前臂、手部的连杆模型, 精准表征肩、肘、腕三关节的运动轨迹。例如, 焦宗琪等基于 D-H 参数法构建上肢外骨骼机器人运动学模型, 通过齐次变换矩阵求解上肢末端的位置, 为轨迹规划提供了精准的数学基础<sup>[9]</sup>; 在下肢康复设备建模中, 研究者以髋、膝、踝三关节为核心, 建立大腿、小腿、足部的连杆坐标系, 实现行走、屈伸等康复动作的轨迹描述<sup>[10]</sup>。除 D-H 参数法外, 部分研究采用凯恩方程、拉格朗日方程等方法构建运动学模型, 但由于计算复杂度较高, 在实际设备研发中的应用相对有限<sup>[11]</sup>。

现有运动学建模技术虽能满足基础轨迹规划需求, 但仍存在局限性: 多数模型未充分考虑人体运动的个体差异, 采用标准化参数构建模型, 难以适配不同体型、运动能力的患者; 同时, 未考虑关节活动范围限制、肌肉协同作用等生理特性, 导致模型与人体实际运动规律存在偏差。

### 2.2 动力学建模技术

动力学建模聚焦于分析人体四肢运动与设备驱动过程中的力学特性, 包括惯性力、驱动力矩、接触力等, 是实现设备精准驱动与安全控制的关键<sup>[12]</sup>。当前, 四肢康复辅助设备的动力学建模主要采用拉格朗日方程法、牛顿-欧拉方程法及凯恩方程法等。

拉格朗日方程法基于能量守恒原理, 通过构建系统的动能与势能函数求解动力学方程, 具有建模思路清晰、方程结构简洁的优点, 广泛应用于上肢外骨骼机器人的动力学建模<sup>[13]</sup>; 牛顿-欧拉方程法从刚体运动的受力平衡出发, 通过递推计算实现多连杆系统的动力学求解, 计算效率较高, 适用于下肢康复设备的实时动力学分析<sup>[14]</sup>。张玉叶等基于牛顿-欧拉方程法构建下肢康复外骨骼的动力学模型, 精准计算了行走过程中各关节的驱动力矩, 为设备驱动参数优化提供了力学依据<sup>[15]</sup>。

动力学建模的核心挑战在于如何精准表征人体与设备的耦合力学特性。人体四肢运动涉及肌肉、骨骼、关节等多个组织的协同作用, 力学特性复杂且具有非线性, 传统动力学模型多采用简化假设(如将人体肢体视为刚性连杆), 导致模型精度受限; 同时, 设备与人体的接触力分布不均, 难以精准测量, 进一步影响了动力学模型的准确性。

## 3 智能算法在设备模型优化中的应用进展

智能算法是提升康复辅助设备建模精度与控制性能的核心驱动力, 通过融合传感器数据与模型参数, 实现设备的个性化适配与精准控制<sup>[16]</sup>。当前, 应用于四肢康复辅助设备模型优化的智能算法主要分为三类: 优化算法、控制算法、运动意图识别算法, 三类算法协同作用, 构成“感知-决策-执行”的闭环优化体系。

### 3.1 优化算法的应用

优化算法主要用于设备模型参数优化与轨迹优化, 核心目标是最小化设备辅助轨迹与患者期望轨迹的偏差, 提升设备的适配性。常用的优化算法包括粒子群优化 (PSO) 算法、遗传算法 (GA)、模拟退火 (SA) 算法等。

粒子群优化算法因收敛速度快、参数设置简单, 在设备参数优化中应用广泛。传统 PSO 算法存在后期收敛速度慢、易陷入局部最优的问题, 研究者通过改进惯性权重、引入变异操作等方式提升算法性能。梁昌兴等提出相对传统粒子群优化算法来说, 改进型粒子群优化 (IPSO) 算法的收敛速度较高, 采用该算法进行的机械臂轨迹规划使机械臂整个轨迹的运动时间缩短了约 45.7%<sup>[17]</sup>; 遗传算法具有全局寻优能力强的优点, 适用于康复轨迹的多目标优化, 如同时优化轨迹平滑性与能耗, 但由于计算复杂度较高, 实时性较差, 限制了其在实时控制中的应用<sup>[18]</sup>; 模拟退火算法通过模拟晶体退火过程实现全局寻优, 能够有效避免局部最优, 常与其他算法融合使用, 提升优化效果<sup>[19]</sup>。

### 3.2 控制算法的应用

控制算法负责根据患者运动状态动态调整设备的辅助策略, 实现设备与人体运动的精准协同。常用的控制算法包括模糊 PID 控制算法、自适应控制算法、滑模控制算法等, 其中模糊 PID 控制算法因兼具模糊控制的自适应能力与 PID 控制的高精度优点, 成为康复辅助设备控制的主流技术。

模糊 PID 控制算法通过模糊规则动态调整 PID 参数, 能够有效应对人体运动的非线性与时变特性。王宇等将模糊 PID 控制算法应用于下肢康复外骨骼, 根据关节角度误差与误差变化率动态调整控制参数, 使轨迹跟踪误差均值降至 0.52°, 较传统 PID 算法提升了 62.3%<sup>[20]</sup>; 自适应控制算法通过实时识别系统参数变化调整控制策略, 适用于康复过程中患者运动能力动态变化的场景<sup>[21]</sup>; 滑模控制算法具

有抗干扰能力强的优点, 能够应对设备运行过程中的外部扰动, 但存在抖振问题, 需通过改进控制律缓解<sup>[22]</sup>。

### 3.3 运动意图识别算法的应用

运动意图识别是实现设备主动辅助的前提, 核心目标是通过采集人体生理信号 (如肌电信号、脑电信号) 或运动参数 (如关节角度、角速度), 精准识别患者的运动需求<sup>[23]</sup>。常用的运动意图识别算法包括支持向量机 (SVM)、人工神经网络 (ANN)、深度学习算法等。

表面肌电信号 (sEMG) 包含丰富的运动意图信息, 是运动意图识别的主要数据源<sup>[24]</sup>。支持向量机算法因泛化能力强、适用于小样本数据, 被广泛应用于肌电信号的分类识别, 如识别上肢的抬举、弯曲等动作<sup>[25]</sup>; 人工神经网络算法具有较强的非线性拟合能力, 能够处理复杂的肌电信号特征, 提升识别准确率<sup>[26]</sup>; 深度学习算法 (如卷积神经网络 CNN、循环神经网络 RNN) 通过多层网络结构自动提取肌电信号的深层特征, 进一步提升了运动意图识别的精度与鲁棒性<sup>[27]</sup>。李宪华等基于 CNN 算法构建肌电信号识别模型, 在公开数据集 Ninapro DB4/DB5 和自采的 6 类上肢动作数据中, 平均识别准确率分别达到了 93.43%、92.37% 和 97.54%, 并且在上肢动作识别实验中 5 名实验人员的 6 类上肢动作的平均识别准确率达到了 87%<sup>[28]</sup>。

## 4 结论

本文系统梳理了智能算法在四肢康复辅助设备模型构建与优化领域的研究进展, 明确了运动学与动力学建模技术的核心地位, 分析了优化算法、控制算法、运动意图识别算法的融合应用路径。当前研究已初步实现智能算法与康复辅助设备的融合, 显著提升了设备的控制精度与适配性, 但仍存在模型精准度不足、算法实时性欠佳、临床适配性有限、验证体系不完善等问题。

未来, 通过研发高精度建模技术、高效鲁棒的智能算法、个性化临床适配技术及完善的验证体系, 将进一步推动四肢康复辅助设备的智能化升级, 加速技术的临床转化。本综述为该领域的后续研究提供了清晰的学术脉络与技术参考, 相信随着智能技术与康复医学的深度融合, 四肢康复辅助设备将在临床康复治疗中发挥更大的作用, 为肢体功能障碍患者带来更好的康复体验。

## 参考文献

- [1] 叶晓彬, 凌丹. 肢体功能障碍患者的社会康复模式[J]. 中国社会工作, 2025, (27): 33-35.
- [2] 王丽春, 黄芳艳. 四肢骨折病人早期康复锻炼依从性的研究进展[J]. 全科护理, 2022, 20(26): 3625-3628.
- [3] 徐秒, 金学勤, 王静静. 康复机器人在四肢骨折术后康复中的应用进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(10): 1706-1710.
- [4] 白哲豪. 个性化四肢康复矫形器设计研究[D]. 中国矿业大学, 2021.
- [5] 楼蓄. 残疾人康复数据挖掘与辅助决策系统的设计与实现[D]. 浙江大学, 2015.
- [6] 张鹏. 神经康复理疗设备的 FBS 拓展模型构建与应用[D]. 燕山大学, 2021.
- [7] 王良文, 宋康康, 时长敏, 等. 基于球副的三自由度踝关节辅助康复装置逆运动学建模分析[J]. 机械传动, 2017, 41(05): 81-85.
- [8] 马露红. 混合 D-H 参数法与改进 CSA 的康复机器人在老年人体育锻炼中的应用[J]. 喀什大学学报, 2024, 45(03): 85-89.
- [9] 焦宗琪, 孟巧玲, 邵海存, 等. 上肢康复训练与生活辅助机器人的设计与研究[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(09): 1219-1222.
- [10] Stonkus A M, Royal D K. Further Validation of the Inventory of Mental Toughness Factors in Sport (IMTF-S) [J]. International Journal of Psychological Studies, 2015, 7(3): 35.
- [11] 闵磊. 比较凯恩方程与拉格朗日方程[J]. 新疆工学院学报, 1997, (01): 10-13.
- [12] 张陈, 周子健, 冉令华, 等. 基于三室动力学模型的髌、膝和踝关节等张肌耐力疲劳建模[J]. 医用生物力学, 2025, 40(01): 163-170.
- [13] 陈立群. 第一类拉格朗日方程: 历史与表述[J/OL]. 力学与实践, 1-6[2026-01-06].  
<https://link.cnki.net/urlid/11.2064.O3.20251201.0911.002>.
- [14] 曹立华. 基于牛顿—欧拉方程的固流耦合模拟[D]. 辽宁师范大学, 2009.
- [15] 张玉叶, 张原园, 毛少坤, 等. 基于牛顿-欧拉法的人体下肢动力学分析与建模[J]. 咸阳师范学院学报, 2018, 33(04): 51-55.
- [16] 张晨, 倪帆, 章闯. 智能医疗康复机器人驱动控制系统设计[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(27): 20-23.
- [17] 梁昌兴, 姚佳俊, 金哲增, 等. 基于 IPSO 算法的机械臂轨迹规划[J]. 成组技术与生产现代化, 2024, 41(03): 13-21.
- [18] 杜群星, 曹东兴, 张宇婷. 基于改进遗传算法的 RRRP 型康复机器人逆解研究[J]. 机械设计, 2025, 42(10): 57-65.
- [19] 徐力, 郭巧, 陈海英. 跑步运动下肢冗余肌力的优化求解和分析[J]. 北京理工大学学报, 2004, (10): 869-873.
- [20] 王宇, 李健, 梁鹏, 等. 基于模糊 PID 控制的柔性下肢助力外骨骼[J]. 机械工程师, 2024, (07): 38-42.
- [21] 李嘉聪. 基于数据驱动的上肢康复机器人交互控制与实验研究[D]. 长春工业大学, 2023.
- [22] 丁志毅, 曹东兴, 张宇婷. 基于模糊滑模控制的关节康复机构轨迹跟踪[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(06): 95-99.
- [23] 陆海宇. 基于人体运动意图识别的下肢康复机器人控制技术研究[D]. 北部湾大学, 2025.
- [24] 王金强. 基于表面肌电信号的上肢康复训练主动交互技术研究[D]. 曲阜师范大学, 2025.
- [25] 肖琳琳. 中风病人康复动作识别与判断方法研究[D]. 山东科技大学, 2019.
- [26] 张伟, 孟青云, 李敏吉. 机器学习在康复机器人研究中的应用[J]. 软件, 2022, 43(09): 87-90.
- [27] 赵鹏辉. 面向手部连续运动估计的深度学习算法研究[D]. 大连海事大学, 2024.
- [28] 李宪华, 尹胜, 邱洵, 等. 基于双流卷积神经网络的表面肌电信号上肢动作识别[J/OL]. 中国机械工程, 1-13.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS