

# 下肢康复机器人研究现状综述

谭啸海<sup>1\*</sup>, 王春宝<sup>1,2,3,4#</sup>, 韦建军<sup>1</sup>, 刘铨权<sup>2,3</sup>, 段丽红<sup>2,3</sup>, 张鑫<sup>2,5</sup>, 刘琦<sup>2,3</sup>, 吕筱薇<sup>4</sup>

<sup>1</sup>广西科技大学, 机械与汽车工程学院, 广西 柳州

<sup>2</sup>深圳大学第一附属医院, 广东 深圳

<sup>3</sup>深圳市第二人民医院, 广东 深圳

<sup>4</sup>广东铭凯医疗机器人有限公司, 广东 珠海

<sup>5</sup>深圳市大鹏新区南澳人民医院, 广东 深圳

收稿日期: 2022年9月2日; 录用日期: 2022年11月1日; 发布日期: 2022年11月9日

## 摘要

我国人口老龄化的现象日益严重, 脑卒中以及各种事故导致的截瘫患者不断增加, 严重影响着患者的日常生活。随着下肢障碍患者人数增加, 康复医师的缺乏问题亟待解决, 因此, 康复机器人的研发对于医疗发展具有重要意义。本文针对下肢康复机器人的国内外研究现状进行列举, 从下肢康复机器人的结构设计、控制策略和关键技术三个角度对国内外研究现状进行总结, 通过列举国内外不同研究方法总结下肢康复机器人行业今后发展趋势。

## 关键词

下肢康复机器人, 结构设计, 控制策略, 关键技术

# Review of Research on Lower Limb Rehabilitation Robot

Xiaohai Tan<sup>1\*</sup>, Chunbao Wang<sup>1,2,3,4#</sup>, Jianjun Wei<sup>1</sup>, Quanquan Liu<sup>2,3</sup>, Lihong Duan<sup>2,3</sup>, Xin Zhang<sup>2,5</sup>, Qi Liu<sup>2,3</sup>, Xiaowei Lyu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

<sup>2</sup>The First Affiliated Hospital of Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

<sup>3</sup>Shenzhen Second People's Hospital, Shenzhen Guangdong

<sup>4</sup>Guangdong Mingkai Medical Robot Limited Company, Zhuhai Guangdong

<sup>5</sup>Shenzhen Dapeng New District Nan'ao People's Hospital, Shenzhen Guangdong

Received: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Nov. 1<sup>st</sup>, 2022; published: Nov. 9<sup>th</sup>, 2022

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 谭啸海, 王春宝, 韦建军, 刘铨权, 段丽红, 张鑫, 刘琦, 吕筱薇. 下肢康复机器人研究现状综述[J]. 人工智能与机器人研究, 2022, 11(4): 397-410. DOI: 10.12677/airr.2022.114041

## Abstract

The phenomenon of population aging in China is becoming more and more serious, and the number of paraplegic patients caused by stroke and various accidents is increasing, which seriously affects the daily life of patients. With the increase in the number of patients with lower limb disorders, the lack of rehabilitation physicians needs to be solved urgently, so the research and development of rehabilitation robots are of great significance for medical development. This paper enumerates the research status of lower limb rehabilitation robots at home and abroad, summarizes the research status at home and abroad from the three perspectives of structure design, control strategy and key technologies of lower limb rehabilitation robots, and summarizes the future development trend of the lower limb rehabilitation robot industry by listing different research methods at home and abroad.

## Keywords

Lower Limb Rehabilitation Robot, Structural Design, Control Strategy, Key Technology

Copyright © 2022 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

近些年来, 中国患有脑卒中的患者持续上升, 据不完全统计, 我国脑卒中患者人数现已达到 1300 万人, 预计到 2030 年时可能超过 3000 万人。脑卒中患者的中枢神经系统受到损伤, 由于医疗资源紧张以及治疗费用高等各方面的影响, 80% 的患者得不到及时的治疗而导致生活不能自理, 对患者的日常生活造成严重影响。针对此类疾病, 传统的康复医师治疗手段很难满足患者的康复要求, 并且治疗费用很高。康复机器人是当前治疗脑卒中患者的有效手段, 可替代康复医师对患者进行康复辅助训练, 帮助患者早日回归正常生活[1]。因此, 康复机器人的研发对于我国医疗水平的提高以及社会发展具有重要的意义。

科学家通过对神经康复领域的探索, 发现了大脑的结构是可以发生变化的, 中枢神经具有可塑性。随着国内外科技和神经康复领域的不断研究和发展, 康复机器人已逐渐走向科研人员研发的前沿, 不少研究专家和学者在此领域取得了很大的成就[2]。其中, 下肢康复机器人主要是针对下肢中枢神经受损而导致的运动障碍, 可在康复训练前调节好系统引导患者进行康复训练, 造福了无数的脑卒中患者。

本文在阅读了大量的关于下肢康复机器人最新研究成果后, 通过对下肢康复机器人的国内外研究现状分析, 并从结构设计、控制策略、关键技术三个角度进行总结, 列举出下肢康复机器人的特点并概括其优缺点, 最后通过国内外不同的研究总结康复机器人未来的发展方向。

## 2. 下肢康复机器人国内外研究现状分析

### 2.1. 国外研究现状

自康复机器人问世以来, 就受到国内外各个研究机构及高校的重视, 经过近几十年的发展, 康复机器人在其相关领域上已经取得了重大的突破。在康复机器人发展早期, 其结构以及功能都较为简单, 有

代表性的如图 1，这是意大利研发的 Fisiotek [3]，是一种卧式下肢康复训练器，此外还有 Lokomat 下肢康复机器人，如图 2 所示。美国的 Motorika 研发了一款步态康复机器人[4]，他们对肌肉收缩强度进行了计算，同步的机械腿可以保证患者可以模拟正常人步态，降低了机器人对患者可能带来的一些损伤。瑞士 SWORTEC 公司研发的下肢康复机器人 MotionMaker [5]，由两个三自由度的机械臂和座椅组成，这款机器人具有电刺激康复训练的功能，可以根据患者的病程选择主动训练模式和被动训练模式的调节，并且座椅的角度也可以自由调节，相对于常规的下肢康复机器人更加舒适安全。瑞士的 Hocoma 公司研发的卧式下肢康复机器人 ErigoPro，它是以脚板为主动关节，通过推动脚板使得膝关节、踝关节进行康复训练，并且由丝杠螺母机构带动髋关节运动，它的连杆机构十分灵活，姿势可以调节平躺也可以站立，不足之处是在训练过程中不能自主调节，需要人来控制。



Figure 1. Italian Fisiotek

图 1. 意大利 Fisiotek



Figure 2. Lokomat

图 2. Lokomat

## 2.2. 国内研究现状

国内下肢康复机器人正处于起步阶段，但是也取得了一定的卓越成果。燕山的李双为掌握下肢

康复机器人动力学特征，对其进行了动力学建模和仿真研究，它的设计原理是采用两个 3-PRPR 并联机构左右对称放置，将其简化为三平移并联机构模拟人体下肢，对踝关节、膝关节、髋关节进行剖析，在一定程度上保证了机器的安全性及舒适性，如图 3 所示[6]。



**Figure 3.** Lower limb rehabilitation robot  
**图 3.** 下肢康复机器人

上海璟和技创公司研发的 Flexbot 康复机器人是基于神经可塑性原理帮助患者恢复步行功能的机器人，如图 4 所示，它可实现踝关节、膝关节、髋关节的组合训练，并有虚拟步行情景的功能，不足之处是只能进行步态训练，功能较为单一，并且虚拟现实技术不够完善，未能实现与康复机器人同步运动。

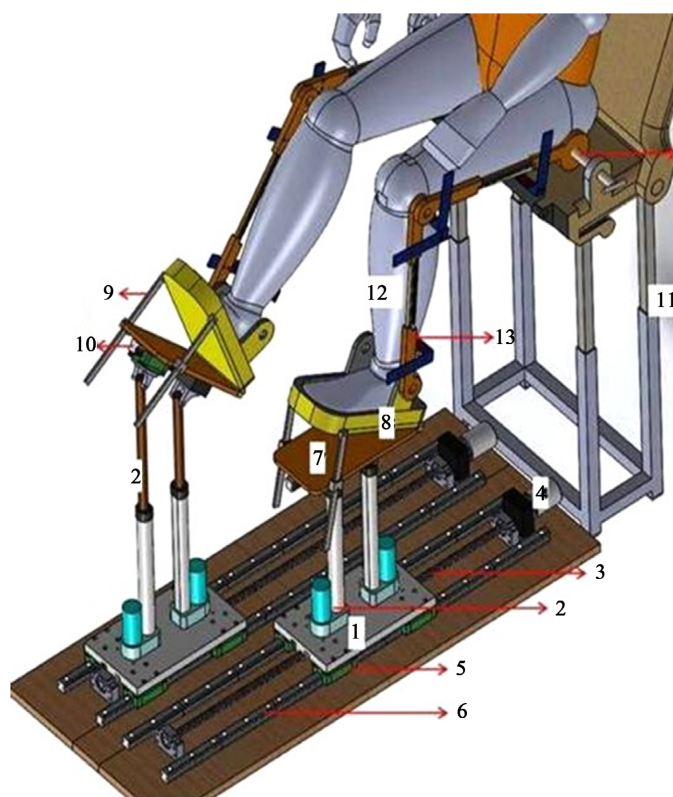


**Figure 4.** Flexbot rehabilitation robot  
**图 4.** Flexbot 康复机器人

燕山大学梁文龙[7]，他针对膝关节障碍患者的股四头肌经常有损伤，设计了下肢股四头肌康复训练机器人，在训练过程中，其工作原理是通过康复机器人下端的伺服电机用滚珠丝杠把力施加于大腿推杆上，驱动髌关节处进行屈伸运动，其不足之处是功能性比较单一，并且在实际情况下传感器容易受到干扰。杨力[8]对四自由度下肢康复机器人结构进行了设计和优化，他针对同身高不同步态周期的髌关节、膝关节、踝关节角度变化进行了实验，保证了康复的安全性。

### 3. 下肢康复机器人结构设计

为了满足下肢康复机器人的灵活运动及康复效果，对于康复机器人得结构设计显得十分重要。印度印多尔理工学院的 J.K. Mohanta 等人研发了一种基于坐姿训练器，克服下肢功能缺陷为肢体提供引导的坐式下肢康复机器人，其对该康复机器人的结构设计如图 5 所示[9]，该设计滑块运动的轨道与底座是平行的，此种布置可以更好地承受重载和非平面荷载，使得结构具有更好的稳定性，滚珠丝杠由轴颈轴承支撑，以减少旋转摩擦和分布在轴上的载荷轨道消除了作用在其上的垂直载荷。



- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| 1. Horizontal moving Base     | 9. Angle Adjusting Rod                  |
| 2. Vertical actuator cylinder | 10. Slider arrangement in Foot platform |
| 3. Ball Screw-Nutsystem       | 11. Chair with Adjustable height        |
| 4. DC Geared Motor            | 12. Patient's Leg                       |
| 5. Linear slider Block        | 13. Customizable Orthosis               |
| 6. Linear slider Guideway     | 14. Orthosis fixing with hip            |
| 7. Foot Platform              | 15. Strapes in orthosis for fixing with |
| 8. Adjustable footrest        |   |

Figure 5. Sitting lower limb rehabilitation robot

图 5. 坐式下肢康复机器人

中国科学院自动化研究所的 Weiqun Wang 等人提出了一种下肢康复机器人腿部矫正器，虚拟样机如

图6所示[10],丝杠可以视作滑动杆,连接的螺母螺钉可以简化为滑动副,由直流电机驱动,并且它可以相对于基座旋转,每个杆与杆之间构成转动副,很契合患者的腿部关节,通过对器械尺寸优化并使用了丝杠,使得连接机构有较高的传动比,因此,该机构没有额外的减速系统,使得传动系统更加稳定,并对髋关节和膝关节进行了优化,分别建立了具有强非线性特征的机构。

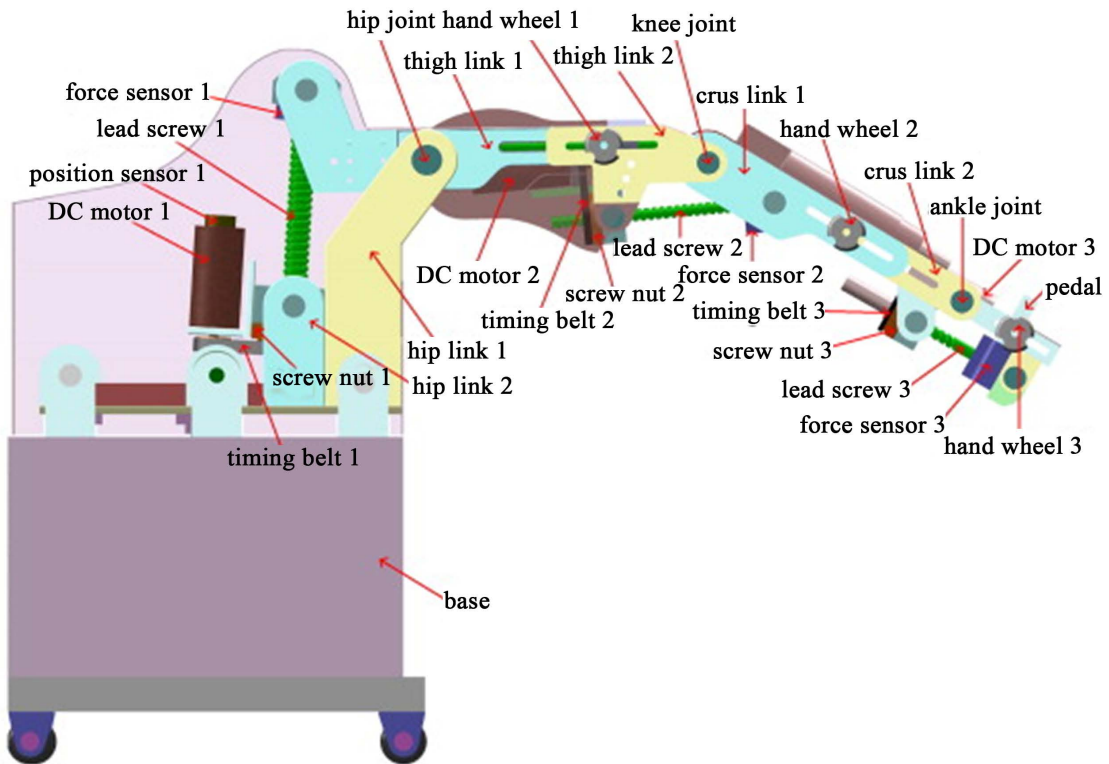


Figure 6. Sitting lower limb rehabilitation machine

图6. 坐式下肢康复机器人

土耳其伊尔迪兹科技大学的 Erhan Akdogan [11]等人针对脊髓损伤的康复研发了一款三自由度治疗性康复机器人,他们考虑到膝关节部分的电机不能受到载荷的影响,将其放置在了不产生任何重力载荷的地方,连杆1带动着膝关节的伸展运动,连杆2采用的是平行四边形结构,这样可以将移动膝关节连杆的致动器放置在底座上。下肢康复机器人最重要的设计部分是具有可穿戴性的外骨骼机械腿,华北理工大学的赵闯[12]提出了一种将智能轮椅和外骨骼机械腿结合的下肢康复机器人,他基于人体下肢关节运动传递的信息,对人体下肢髋关节、膝关节、踝关节转角分析,设计出了关节运动极限、标准步态运动、设计限位角度的范围,在髋关节、膝关节、踝关节各有一个转动自由度,大腿处支架部分是中空的,由腿部连杆和长度调节杆组成,大腿上端通过内六角螺栓与髋关节连接,这样可以适应不断身高患者康复训练要求。

## 4. 下肢康复机器人控制策略

### 4.1. PID 控制法

PID 控制法是比较、积分和微分叠加的符合控制,它最早是被美国的 Lum. P.S [13]应用到康复机器人的训练当中,当时是研发了一款上肢康复机器人,主要工作机理是靠驱动电机带动手柄工作,通过练习

手部的移动协调性来完成康复训练。华北理工大学的洪健俊阐述了 PID 控制器是如何反馈的, 他针对传统 PID 控制不能达到精确控制, 将 PID 控制器和模糊控制算法结合优化, 设计的 PID 控制器仿真模型如图 7 所示[14], 提高了系统的动态性能。P.N.Q. Nhon [15]等人提出传统 PID 控制在非线性系统中的精确度低且受外界干扰较大, 针对此问题提出 PID 控制器的谐振方法, 并通过实验证明了模糊 PID 控制器比传统 PID 控制更有效, 提高了机器的精确度和响应速度。武汉轻工大学的胡凹[16]研发了一种下肢振动训练康复机器人, 其中的助力辅助训练模式就是采用的一种模糊 PID 控制器, 并结合肌电信号对模糊 PID 参数值进行整定, 提高了系统的稳定性和机器的舒适性。PID 控制法的不足之处就是 PID 控制器对驱动机构要求较高, 有时候很难满足实际需求, 而且 PID 控制器经过整定后参数不发生变化, 很难针对不同的患者进行康复训练。

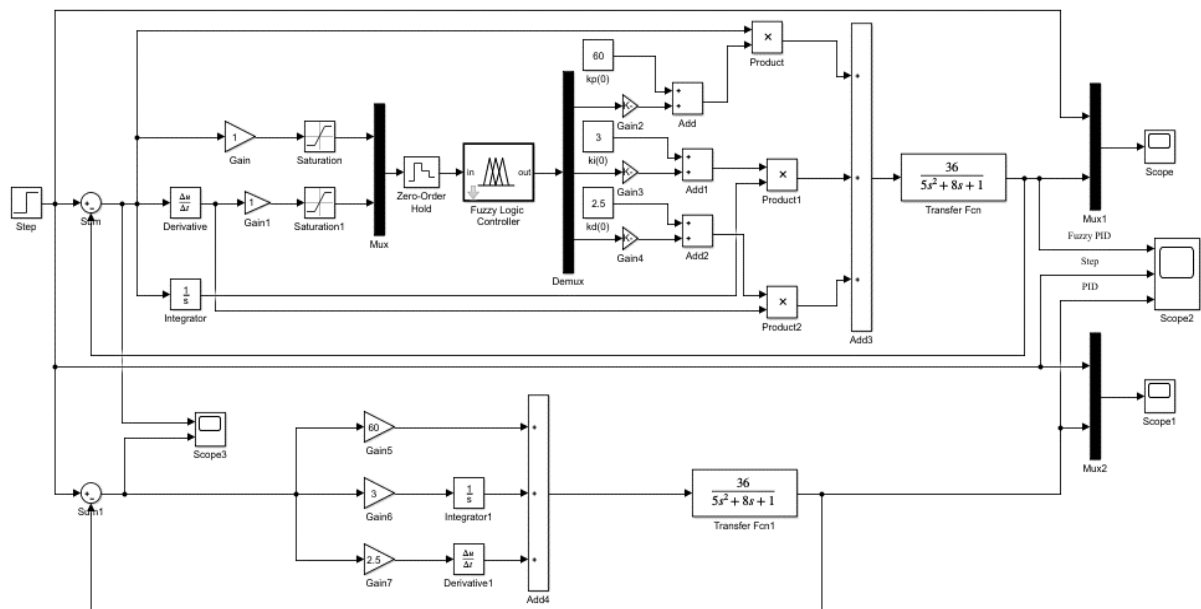


Figure 7. PID controller model  
图 7. PID 控制器模型

#### 4.2. 阻抗控制法

阻抗控制法是通过在康复机器人的末端与环境之间建立质量 - 阻尼弹簧系统, 能使康复机器人在工作时能更加顺畅, 并可以提高工作状态下的安全性[17]。阻抗控制法较早运用到康复机器人中是美国的 Hogan 和 Krebs, 他们研发了一种对手部机能恢复的康复机器人, 与上节提到的 PID 控制方法相比更加平滑和稳定。哈尔滨工程大学机电学院的孙洪颖[18]将阻抗控制应用到了下肢康复机器人被动训练模式控制中, 在康复治疗的过程中, 肌力也会渐渐发生变化, 在训练的过程中可能会出现异常使得运行轨迹偏离, 传统的轨迹控制很难满足要求, 阻抗控制方法便很好的解决了这一点, 避免了机器对患者造成二次伤害, 提高了安全性。广西大学的蒲明辉[19]研发了一种卧式下肢康复机器人主动训练控制策略, 其训练控制策略如图 8 所示, 他改变传统控制方法, 将外环采用阻抗控制, 内环采用计算力矩控制, 建立机器末端与环境的位置关系, 提高了卧式下肢康复机器人控制系统的柔顺性。阻抗控制法不足之处是不同环境下机器人工作的力是差别很大的, 需要使机器人对工作环境全面精确了解, 而且不适用于高精度的康复工作。

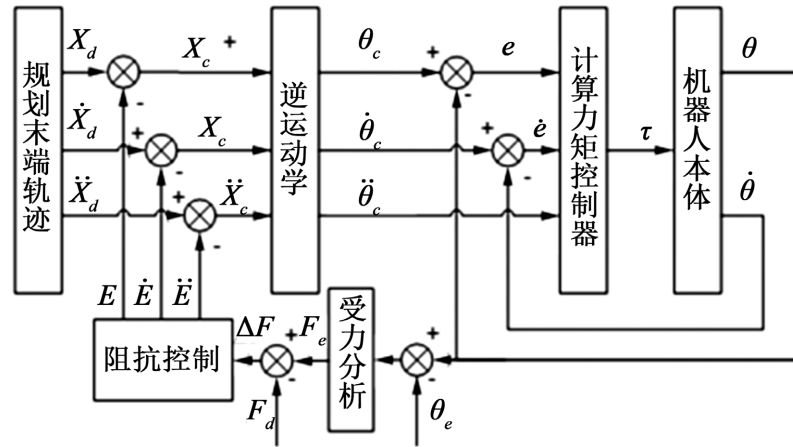


Figure 8. Block diagram of an impedance control strategy  
图 8. 阻抗控制策略框图

### 4.3. 鲁棒控制法

鲁棒控制法是针对单变量系统在微小摄动下的不确定性，它的控制系统一般情况下并不是最优状态，主要目的是在实际情况下控制系统的不确定性在最差的情况下仍保证系统稳定、可靠[20]。康复机器人在辅助患者进行康复训练时，不同患者的体重差异以及训练过程中肌力的变化会对控制系统产生干扰信号，孙尧[21]设计的鲁棒控制器可以有效抑制外界干扰信号对控制系统的影响，保证了闭环系统的鲁棒性。曲阜师范大学的曹金鑫[22]提出了下肢康复机器人步态规划与控制研究，由于下肢康复机器人在建模过程中忽略了一些不确定因素而导致性能不佳，他提出了一种模糊快速非奇异终端滑模控制，其控制器的结构如图 9 所示，增强了系统的鲁棒性，解决了控制器收敛速度慢、跟踪误差大的问题，可以很好地满足患者在康复训练时的期望轨迹和精度要求。安徽大学的陈军设计了一款鲁棒跟踪优化控制器[23]，他运用 Lyapunov 稳定性相关内容对控制系统依次分析，并对系统性能指标进行了不等式计算，增强了关节间的柔顺性，实用性较高。鲁棒控制法的不足之处是需要较大的控制量以保证控制系统状态收敛，但是太大的控制量会导致控制精度减小。

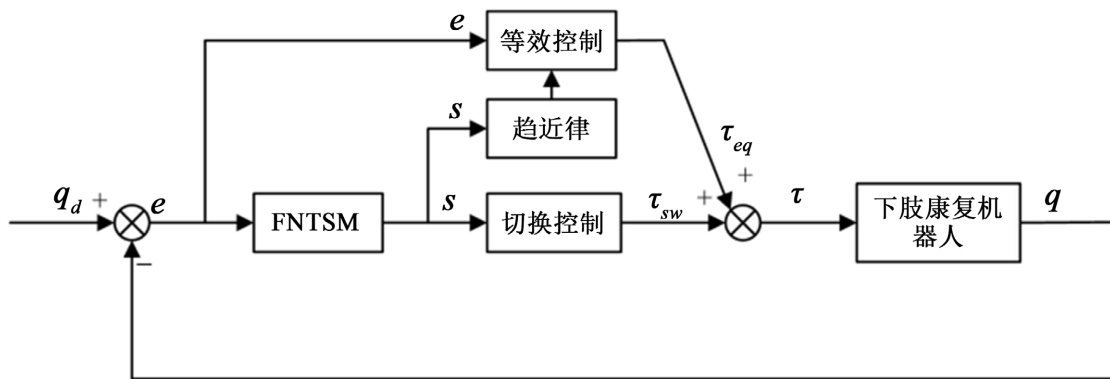


Figure 9. Block diagram of an impedance control strategy  
图 9. 阻抗控制策略框图

### 4.4. 自适应控制法

自适应控制法是通过控制系统输入量、输出量等性能指标来检测机器人，在机器人对患者产生不利



的影响时，控制系统主动对不利的影 响进行改善控制，使得控制系统适应被控对象和外界干扰的变化。北方工业大学的梁旭等人[24]针对患者在康复训练过程中人体阻抗参数动态变化的问题，设计出了一种模糊变刚度自适应调节器，其控制方案如图 10 所示，通过降低位置跟踪精度获得主动柔顺性，避免了患者下肢与机器发生对抗，实现了人体阻抗的自适应，保证了患者主动训练时的安全。燕山大学的冯永飞[25]研发了一款下肢康复机器人，为了可以更好体现患者的康复状态，提出了反映患者的康复状态的自适应控制系统，以满足患者达到最佳训练状态。自适应控制的不足之处是在识别参数的过程中所需计算量大，当受到外界干扰时，参数的辨识不准确，使得系统的稳定性下降。

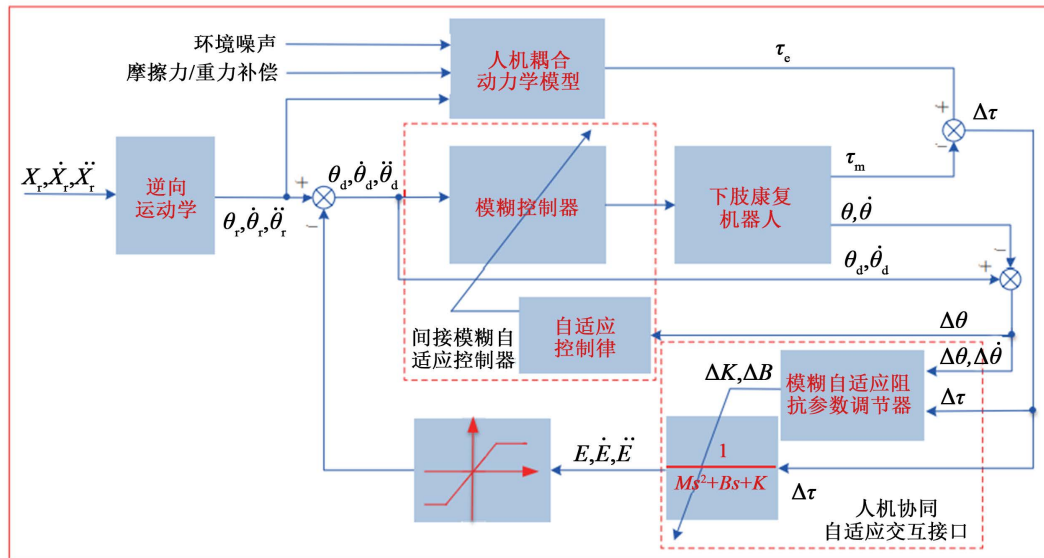


Figure 10. Fuzzy variable stiffness adaptive control scheme  
图 10. 模糊变刚度自适应控制方案

## 5. 下肢康复机器人关键技术

### 5.1. 传感器技术

传感器技术是康复机器人的适应性以及安全性的重要保证，感知系统主要由角度传感器、压力传感器、编码器等组成，传感器技术的研发对于下肢康复机器人的发展具有重要作用[26]。燕山大学的高帅[27]研究设计了一款坐躺站可收展下肢康复机器人，其对椅背、座板之间就采用了角度传感器，足部采用高精度六维力传感器，如图 11、图 12 所示，通过观测数据来了解患者的康复情况，并且传感器的扭矩过大时，会自动报警并停止机器的运行，以保证患者的安全，在展腿模块安装了接近传感器，已达到非接触式检测目的。

北京石油化工学院的张艳琦[28]基于运动损伤设计了一款康复机器人，其中在控制系统中的电机驱动器的输出端中采用了力矩传感器，主要作用是提供康复机器人主动训练时的力反馈信息，便于控制实时阻抗值。河南科技大学的杨浩[29]等人为改善卧式下肢康复机器人的运动轨迹难以改变、训练模式单一的问题，在机器人的末端安装了六维力觉传感器，通过计算得到了各个关节在不同运动中的角度，使机器更好的按照预期的轨迹进行工作。Muro-de-la-Herran [30]在对步态分析时应用到了 IMU 传感器，即惯性传感器，主要用于测量角度便于观察患者的状况，记录完整的步态周期。传感器技术可以实现微小信号的感知与传递，根据传感器获取的信息数据进行判断，以确保康复机器人进行相应的动作，因此，传感器技术也将向着智能化、高效化的趋势发展。



**Figure 11.** Angle sensor  
**图 11.** 角度传感器



**Figure 12.** High-precision six-dimensional force sensor  
**图 12.** 高精度六维力传感器

## 5.2. 通信技术

通信技术是康复机器人工作过程中对患者状况实时的检测起到重要作用，通信技术的不断完善也是对于提高康复效率 and 安全性具有重要意义。北京林业大学控制工程的郭晓娟[31]研发了坐式下肢康复机器人控制系统，其数据通信是通过触摸屏的串口和 STM32 控制器实现的，考虑到在通信过程中的外界干扰，还利用了采样技术进行有效接收。北京信息科技大学的吴达[32]研发了一款针对术后康复训练下肢康复机器人的控制与检测系统，他设计的 WIFI 无线通信电路如图 13 所示，选用了 ESP-M1 芯片，把 STM32 主控制器 RX 接口与芯片的 TXD 接口连接，完成整个电路的设计，此种通信电路具有传输速度快、支持多人连接等优点。Fengmei Gao 等人[33]通过对可穿戴式下肢康复训练机器人的研究，设计了一套基于 BP 算法的模糊神经网络控制系统，他们提取肌电信号特征值进行分析，验证了研究设计的合理性。当前，随着康复机器人功能的不断优化，对于通信技术的要求也越来越高，未来必将加强通信技术研究，创建强大的新一代信息基础设施。

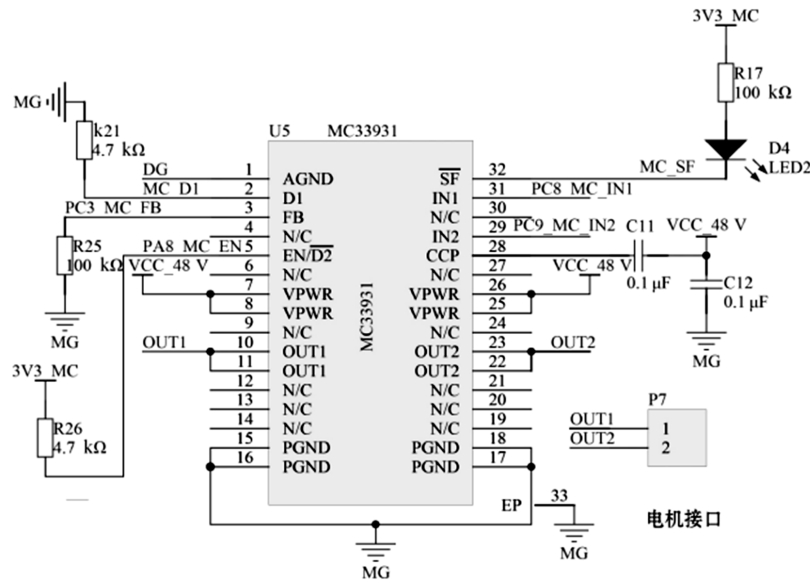


Figure 13. WIFI wireless communication circuit  
图 13. WIFI 无线通信电

### 5.3. 人机交互技术

人机交互技术在此领域是指患者与康复机器人之间交流、互动的技术，经过几十年的发展现已经成为一项非常主流的核心技术。康复机器人的人机交互技术主要是通过人体生理信号和力及位置信息两种形式实现，即感知型和物理型[34]。Di Shi 等[35]基于人机交互动力学模型研发了下肢康复机器人，在康复训练过程中，由于患者自身几乎没有自主行动力，患者人体运动意图识别的方法受到限制，人机交互技术便很好地解决了这一问题，提高了患者的便利性和舒适感。中国的杜义浩[36]发现康复机器人在面对不同的患者时，虽然控制方法具有一定的人机交互能力，但是由于个体的差异性使得康复训练效果不明显，并且人机交互也使得康复机器人具有时变不确定性，很难实现有效控制，他针对此问题建立动力学模型，其人机交互力采集实验过程如图 14 所示。

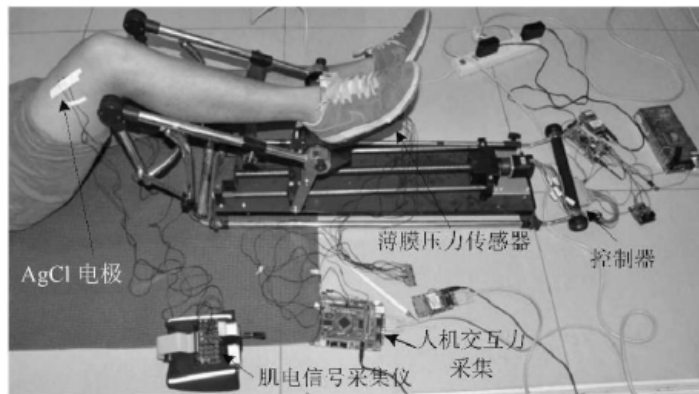


Figure 14. Human-computer interaction experiments  
图 14. 人机交互实验

他提出基于 sEMG 和力反馈信息融合的自适应人机交互控制策略，实现了下肢康复机器人自适应人机交互控制。如今，人机交互在软件方面更趋向于人性化，新技术的采用使得人与机器的交互性增

强,在未来,虚拟现实技术与人机交互技术将更加贴合,软件的实用性也将大幅度提升,以提高患者的体验感。

## 6. 总结与展望

目前,随着康复机器人的各项技术不断成熟,我国在下肢康复机器人领域取得了一些突破性进展。下肢康复机器人作为一种可替代康复医师的智能辅助康复设备,是一种复杂的人机耦合一体化系统,在医疗器械领域已经逐渐向商业化模式发展,帮助患者早日回归正常生活。本文主要从下肢康复机器人的结构设计、控制策略和关键技术对各种下肢康复机器人进行了调研总结分析,未来康复机器人可能从以下几个方面发展:

1) 下肢康复机器人最终面向的是下肢功能障碍的患者,所以在结构设计上应该更加具备安全性和实用性,要考虑到机器实体可能会给患者造成的二次损伤,在研发时应从材料选择和结构设计进行改进,以改善机器的柔性。同时,由于康复机器人的技术较为先进,许多患者难以承担其成本,降低成本会使康复机器人更容易被患者接受,能为更多的患者提供康复训练。

2) 随着康复机器人技术的蓬勃发展,对电机的控制性能要求也越来越高,精确的跟踪响应和系统稳定性等显得尤为重要,每种控制策略都有其优点和不足,在控制策略之间结合能有效弥补单一控制算法的不足,以提高控制效果。目前,在康复机器人领域控制策略之间的结合不够成熟,未能将智能控制算法的优势充分发挥,未来仍需在此领域进行深入研究,让控制算法之间高效结合,以达到预期的工作效果。

3) 为了更好地获取、处理康复训练时的数据,有效反映出患者实时的状态和康复效果,人机交互等技术起到了关键作用,康复训练模式重点在于主动康复训练,提升康复训练的趣味性能使患者更容易接受,目前,一些研发者正在将虚拟现实系统应用到康复机器人领域中去,在神经康复疗法中具有积极作用。康复机器人与人工智能结合是发展的必然趋势,将虚拟现实技术应用到人机交互中,患者主动训练的积极性会得到极大提高。

为了可以更好实现康复训练,在康复机器人研发领域上应该更加注重对结构模块化的设计,将人工智能控制系统加以改进,并且应该建立完善的康复训练效果评价系统。在未来,康复机器人一定是我国医疗康复领域的重要产业,在研发上也定会向着低成本、智能化等方向发展,相关关键技术的应用也会成为此领域热门行业,康复医疗将在我国医疗领域普及。

## 基金项目

国家自然科学基金(No. 61963007), 深圳市基础研究面上项目(JCYJ20210324122200002), 广东省基础与应用基础研究基金(No. 2021A1515011907), 广东省医学科学基金(No. B2021020), 深圳市大鹏新区医疗健康集团医疗卫生科研项目(2021JTLCYJ03)。

## 参考文献

- [1] 孙亚鲁. 智能化下肢康复机器人联合常规康复对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能的影响[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明医科大学, 2019.
- [2] Zhong, J. and Wang, X. (2022) Effect of Early Rehabilitation on Motor Function Recovery in Stroke Patients with Severe Hemiplegia. 2022 7th International Symposium on Biomedical Science, Biotechnology and Healthcare, 16.
- [3] Deaconescu, T. and Deaconescu, A. (2009) Pneumatic Muscle Actuated Isokinetic Equipment for the Rehabilitation of Patients with Disabilities of the Bearing Joints. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009*, Hongkong, 18-20 March 2009, 1823-1827.
- [4] Cui, Z., Du, L., Wang, P., Cai, X. and Zhang, W. (2019) Malicious Code Detection Based on CNNs and Multi-Objective Algorithm. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, **129**, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.03.010>

- [5] Metrailler, P., Blanchard, V., Perrin, I., *et al.* (2006) Improvement of Rehabilitation Possibilities with the MotionMaker. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, Pisa, 20-22 February 2006, 359-364.
- [6] 李双. 一种可穿戴下肢康复机器人的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [7] 梁文龙. 坐卧式股四头肌康复训练机器人系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [8] 杨力, 徐林森, 王海平. 下肢康复机器人设计与分析[J]. *机械设计与制造工程*, 2020, 49(12): 28-31.
- [9] Mohanta, J.K., Mohan, S., Deepasundar, P. and Kiruba-Shankar, R. (2018) Development and Control of a New Sitting-Type Lower Limb Rehabilitation Robot. *Computers & Electrical Engineering*, **67**, 330-347. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.09.015>
- [10] Wang, W., Hou, Z.-G., Tong, L., Zhang, F., Chen, Y. and Tan, M. (2013) A Novel Leg Orthosis for Lower Limb Rehabilitation Robots of the Sitting/Lying Type. *Mechanism and Machine Theory*, **74**, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.12.021>
- [11] Akdoğan, E. and Adli, M.A. (2011) The Design and Control of a Therapeutic Exercise Robot for Lower Limb Rehabilitation: Physiotherobot. *Mechatronics*, **21**, 509-522. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.01.005>
- [12] 赵闯. 卧式下肢康复机器人设计与动力学研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2020.
- [13] Lum, S.P., Reinkensmeyer, D.J. and Lehman, S.L. (1993) Robotic Assist Devices for Bimanual Physical Therapy: Preliminary Experiments. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, **1**, 185-191. <https://doi.org/10.1109/86.279267>
- [14] 洪健俊. 下肢外骨骼康复机器人控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2021.
- [15] Nhon, P.N.Q., Elamvazuthi, I., Fayek, H.M., *et al.* (2014) Intelligent Control of Rehabilitation Robot: Auto Tuning PID Controller with Interval Type 2 Fuzzy for DC Servomotor. *Procedia Computer Science*, **42**, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.11.050>
- [16] 胡凹. 下肢康复训练机器人的设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
- [17] 丁润泽. 基于阻抗控制的机器人力控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [18] 孙洪颖. 卧式下肢康复机器人研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 30-32.
- [19] 蒲明辉, 尹飞, 赵倩倩, 梁旭斌, 陈琳, 潘海鸿. 卧式下肢康复机器人主动训练控制策略[J]. *机械设计与研究*, 2021, 37(1): 66-70.
- [20] 王悦西. 面向物理人机交互的模块化机器人系统分散鲁棒控制研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- [21] 孙尧. 全方向康复步行训练机器人的鲁棒非线性预测控制[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [22] 曹金鑫. 下肢康复机器人步态规划与控制研究[D]: [硕士学位论文]. 济宁: 曲阜师范大学, 2021.
- [23] 陈军. 下肢外骨骼系统鲁棒跟踪优化控制研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [24] 梁旭, 王卫群, 苏婷婷, 侯增广, 何广平, 任士鑫, 石伟国. 下肢康复机器人的主动柔顺自适应交互控制[J]. *机器人*, 2021, 43(5): 547-556.
- [25] 冯永飞. 坐卧式下肢康复机器人机构设计与协调控制研究[D]: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
- [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.
- [27] 高帅. 一种坐躺站可收展下肢康复机器人机构研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [28] 张艳琦. 运动损伤康复机器人机构设计研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京石油化工学院, 2020.
- [29] 杨浩, 韩建海, 李向攀. 卧式下肢康复训练机器人力觉拖动示教研究[J]. *机械设计与制造*, 2020(5): 272-275.
- [30] Muro-de-la-Herran, A., Garcia-Zapirain, B. and Mendez-Zorrilla, A. (2014) Gait Analysis Methods: An Overview of Wearable and Non-Wearable Systems, Highlighting Clinical Applications. *Sensors*, **14**, 3362-3394. <https://doi.org/10.3390/s140203362>
- [31] 郭晓娟. 坐式下肢康复机器人控制系统设计与开发[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [32] 吴达, 马超, 高经纬, 苏鸿. 下肢康复机器人的训练控制与监测研究[J]. *北京信息科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 36(6): 36-40.
- [33] Gao, F., Wang, L. and Lin, T. (2020) Intelligent Wearable Rehabilitation Robot Control System Based on Mobile Communication Network. *Computer Communications*, **153**, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.054>
- [34] 程洪, 黄瑞, 邱静, 马文昊, 施柯丞, 李骏. 人机智能技术及系统研究进展综述[J]. *智能系统学报*, 2020, 15(2):

386-398.

- [35] Shi, D., Zhang, W., Zhang, W., Ju, L. and Ding, X. (2021) Human-Centred Adaptive Control of Lower Limb Rehabilitation Robot Based on Human-Robot Interaction Dynamic Model. *Mechanism and Machine Theory*, **162**, Article ID: 104340. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104340>
- [36] 杜义浩, 邱石, 谢平, 郭子晖, 吴晓光, 李小隼. 下肢康复机器人的自适应人机交互控制策略[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 743-750.