

# 上肢康复机器人现状研究

杨澳祥<sup>1\*</sup>, 韦建军<sup>1\*</sup>, 张治<sup>1</sup>, 王春宝<sup>1,2,3,4#</sup>, 刘铨权<sup>2,3</sup>, 段丽红<sup>2,3</sup>, 吴正治<sup>2,3#</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, 神经内科, 广东 深圳

<sup>3</sup>深圳市第二人民医院, 神经内科, 广东 深圳

<sup>4</sup>广东铭凯医疗机器人有限公司, 广东 珠海

收稿日期: 2023年8月10日; 录用日期: 2023年10月27日; 发布日期: 2023年11月6日

## 摘要

随着人口老龄化加剧, 脑卒中患者的数量也在增多。在康复治疗方面面临着康复治疗师数量不足、人力成本高等问题, 康复治疗需求广泛。康复机器人对解决此类问题有着准确性、高效性和可控性的优点, 并且可以准确的获得患者康复治疗时的数据, 便于对康复治疗进行评估, 所以康复机器人在康复治疗方面潜力巨大。自上肢康复机器人问世起, 其结构设计与控制方式多种多样。本文从上肢康复机器人末端执行器式与外骨骼式的结构设计和主动与被动的控制策略出发, 总结了其优缺点与对康复治疗效果的影响, 为上肢康复机器人的设计和应用提供了参考。最后对上肢康复机器人进行总结与展望, 对上肢康复机器人未来的发展提出建议。

## 关键词

上肢康复机器人, 结构设计, 控制策略

# A Research on the Current Status of Upper Limb Rehabilitation Robots

Aoxiang Yang<sup>1\*</sup>, Jianjun Wei<sup>1\*</sup>, Zhi Zhang<sup>1</sup>, Chunbao Wang<sup>1,2,3,4#</sup>, Quanquan Liu<sup>2,3</sup>, Lihong Duan<sup>2,3</sup>, Zhengzhi Wu<sup>2,3#</sup>

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

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

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

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

Received: Aug. 10<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 27<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 6<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 杨澳祥, 韦建军, 张治, 王春宝, 刘铨权, 段丽红, 吴正治. 上肢康复机器人现状研究[J]. 人工智能与机器人研究, 2023, 12(4): 255-266. DOI: 10.12677/airr.2023.124029

## Abstract

With the aging of the population, the number of stroke patients is also increasing. In terms of rehabilitation treatment, there are problems of insufficient number of rehabilitation therapists and high labour cost, and rehabilitation treatment needs are extensive. Rehabilitation robots have the advantages of accuracy, efficiency and controllability in solving such problems, and can accurately obtain the data of patients during rehabilitation treatment, which is convenient for evaluating rehabilitation treatment. Therefore, rehabilitation robots have great potential in rehabilitation treatment. Since the advent of upper limb rehabilitation robots, there have been various structural designs and control methods. Starting from the structural design of the end effector and exoskeleton of the upper limb rehabilitation robot and the active and passive control strategies, this paper summarizes its advantages and disadvantages and its impact on the effect of rehabilitation treatment, which provides a reference for the design and application of the upper limb rehabilitation robot. Finally, the upper limb rehabilitation robot is summarized and prospected, and suggestions for the future development of the upper limb rehabilitation robot are put forward.

## Keywords

Upper Limb Rehabilitation Robot, Structural Design, Control Strategy

Copyright © 2023 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

从全世界来看,全球 60 岁以上的人在以每 3% 的速度递增,2017 年达到 9.62 亿,约占世界总人口的 13%。虽然全球老龄化进程不一致,但全球老龄化的趋势是一样的。尤其是欧洲,其老龄人口已经达到了总人口的四分之一,其他地区的老龄化也在加深。全球老龄化趋势已难逆转[1]。根据第七次全国人口普查结果显示[2],中国的人口老龄化程度进一步加深,未来一段时期将持续面临人口长期均衡发展的压力。人口老龄化必将带来更多的老年人常见疾病,在这中脑卒中尤为严重。根据全国范围内的数据显示,我国 40 岁及以上人群中,卒中的标化患病率从 2012 年的 1.89% 上升到了 2019 年的 2.58%。截止到 2019 年,我国 40 岁及以上人群中现患和曾患卒中的人数约为 1704 万[3]。从全球来看,中国脑卒中发病率、患病率、死亡率和伤残调整寿命年均高于发达国家同期水平[4]。而上肢运动功能障碍是脑卒中患者常见的后遗症。研究表明,超过三分之二的卒中患者入院时有手臂运动障碍和功能缺陷,并因此导致生活质量下降和社会参与减少[5]。

人体大脑具有可塑性,这意味着准确和及时的康复训练能够帮助病患进行神经重组或代偿。这样,大脑就能够产生新的神经运动功能细胞,重新建立肢体与脑部损伤中枢神经的联系。这将大大提高病患生存和恢复运动机能的几率[6]。与常规康复训练相比,机器人辅助下的康复训练可以提供视听提示,并能在线反馈关于患者运动表现的信息,有助于提高患者康复的积极性[7]。

因此,上肢康复机器人研究理所当然地成为国内外康复研究的重点和热点,利用机器人辅助进行的康复治疗可以大大改善人工治疗的弊端,在降低治疗保健成本的同时,也保证了康复训练的疗效[8],所以上肢康复机器人对脑卒中患者及医疗行业有着重大意义。

## 2. 上肢康复机器人结构设计研究现状

上肢康复领域的机器人最常用的分类方式是按机器人的构型分为两类:末端执行器式和外骨骼式[9]。

### 2.1. 末端执行器式

末端执行器式康复训练机器人以普通连杆机构或者串联机械结构为主体机构,通过末端执行器同人体手臂固连,牵引人体上肢进行康复训练,以机器人的末端运动规划调整患者的康复训练模式[10]。

内布拉斯加大学的 Carl A. Nelson 等[11]了提出了一种适用于机器人康复的可变刚度机构(如图 1)。通过控制机械臂的关节刚度,来调节机械臂与患者手臂之间的交互力,从而实现不同的康复模式。这解决了康复机器人可变刚度的问题,使得机器人在康复过程中更好的适应患者的需求。

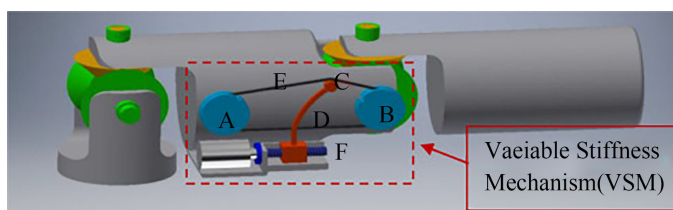


Figure 1. Variable stiffness mechanism

图 1. 可变刚度机构

德国的 Arne Passon 等[12]设计了一个可以通过用可穿戴惯性传感器增强基于末端执行器的基于电缆前臂连接机器人(如图 2),他们提出了一种无磁力计传感器融合方法。它通过在患者手臂上佩戴一个惯性传感器,来实现对上肢运动的精确跟踪和反馈控制。其相比传统方法可以精确跟踪与机器人连接的肢体部位相邻的肢体部位的运动。这种方法具有长时间稳定性和免磁场干扰的特点,可以在室内应用和机器人环境中使用。

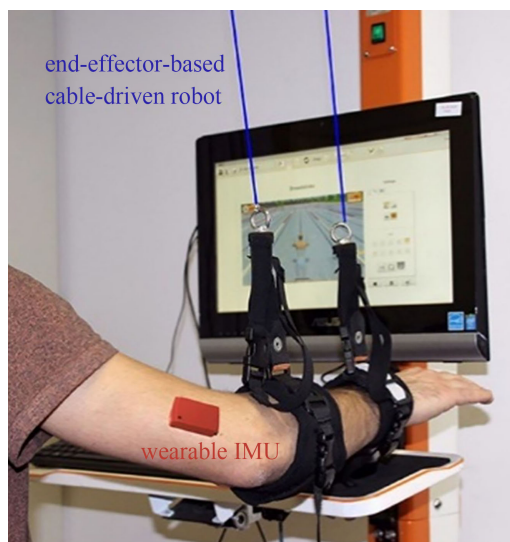
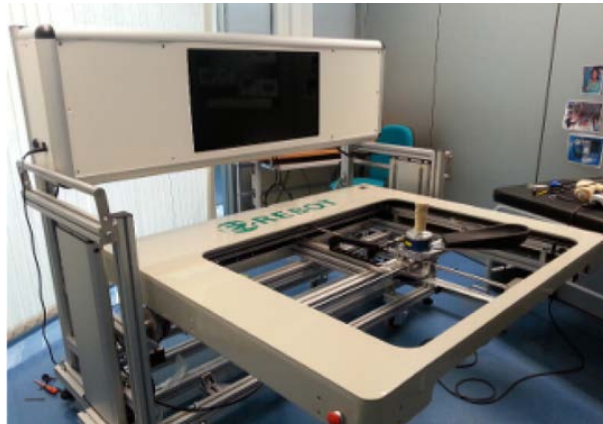


Figure 2. Cable-based forearm connection robot

图 2. 基于电缆的前臂连接机器人

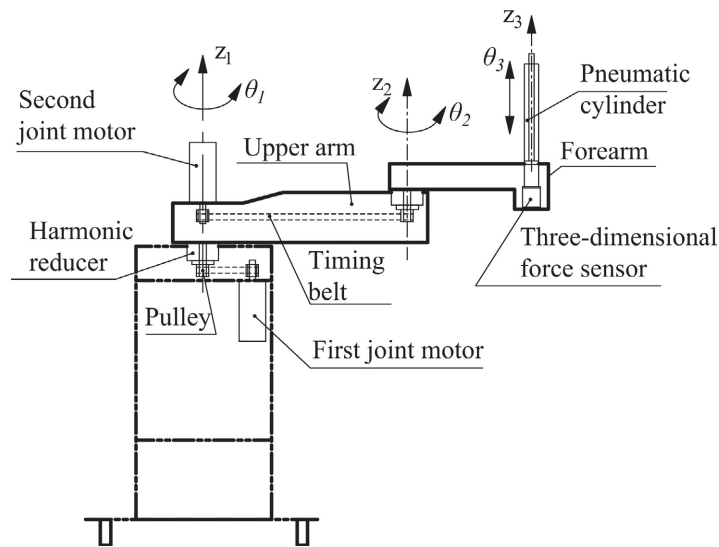
巴利亚多利德大学的 Juan C Fraile 等[13]设计了 E2Rebot 康复机器人(如图 3),其有两个自由度,机械机械结构基于两个笛卡尔的 XY 轴。此平面康复机器人基于“按需协助”范式,有两种以任务为导向

的治疗模式。机器人提供的支持适应患者的要求，在不影响患者健康和安全的条件下保持尽可能密集的治疗，并促进参与，加快康复速度。



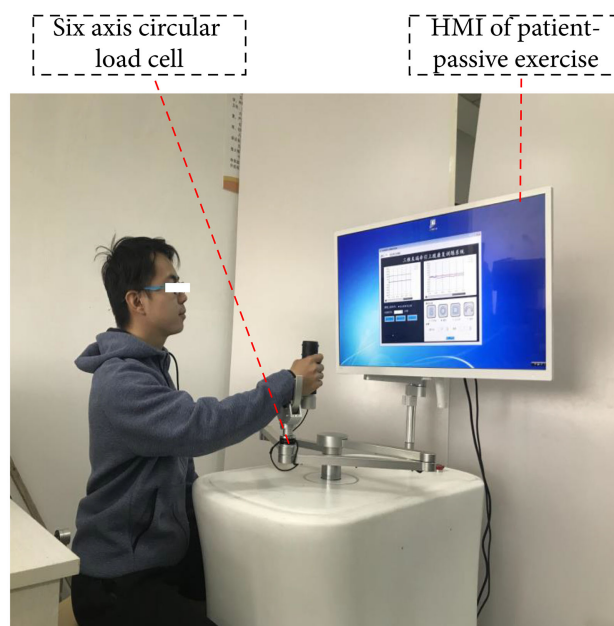
**Figure 3.** E2Rebot rehabilitation robot  
**图 3.** E2Rebot 康复机器人

河南科技大学的李辽元等[14]设计了一种新型末端执行器式上肢康复机器人(如图 4)。它具有 3 个自由度、两个水平旋转自由度由电机驱动，一个垂直平移自由度由气缸驱动。康复机器人是通过末端执行器连接到患者的前臂，然后通过不同的运动模式来实现肩与肘关节的康复运动。根据特定的策略，可以保证准确性和舒适的被动的康复训练，有助于恢复损伤上肢的功能。但气缸的摩擦力并不准确识别并不能准确地补偿在整个中风，仍然存在局部爬行。



**Figure 4.** Structure of upper limb rehabilitation robot  
**图 4.** 上肢康复机器人结构图

北京工业大学的董明杰等[15]开发了一种新型的三自由度(DOF)末端执行器类型上肢康复机器人(如图 5)。其优点设计是通过使用四杆机构和升降机构可以实现三个自由度；其还开发了患者 - 被动练习和患者 - 合作练习，开发的患者 - 合作练习的优点是将人 - 机器人耦合系统模型简化为单个弹簧系统，而不是质量 - 弹簧 - 阻尼系统，有效地提高了控制系统的响应速度。



**Figure 5.** Three-degree-of-freedom rehabilitation robot  
**图 5.** 三自由度康复机器人

## 2.2. 外骨骼式

外骨骼具有类似于人类上肢的结构，具有与上肢关节轴匹配的机器人关节轴。外骨骼被设计为与人类上肢并排操作，因此可以在多个位置连接到上肢。虽然这会使机器人更难适应不同的手臂长度，但多个接口可以让外骨骼完全确定上肢姿势和受控扭矩，分别施加到每个关节上。外骨骼可以通过在某些关节处产生计算的扭矩组合来针对特定的肌肉进行训练。此外，与末端执行机器人相比，可以实现更大的运动范围，从而可以在康复练习中使用更广泛的运动[16]。

瑞士 Hocoma 公司的 ArmeoSpring 机器人(如图 6)是目前国际上成熟的上肢康复训练机器人。ArmeoSpring 是一种上肢外骨骼康复机器人，它能够帮助患者进行自主的上肢和手部训练。ArmeoSpring 通过弹簧储能来平衡对应机械臂关节的重力为手臂重量支撑，可以根据特定的治疗目标完成更多的手臂和手部运动。它允许在广阔的工作空间内同时进行手臂和手部训练。它还提供了一个广泛的游戏式反馈练习库，增强了康复训练的趣味性。而且已有实验表明[17]其在康复治疗方面的可靠性。



**Figure 6.** ArmeoSpring upper limb rehabilitation robot  
**图 6.** ArmeoSpring 上肢康复机器人

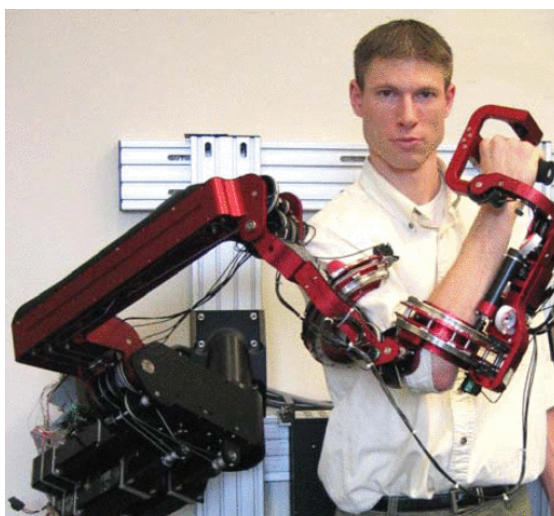


苏黎世联邦理工学院的 Yves Dominic Zimmermann 等[18]介绍了一种基于低阻抗扭矩可控系列弹性执行器的多功能上肢外骨骼康复机器人(如图 7)。其通过一系列连杆机构和特殊的算法相结合,实现大范围运动(ROM)和强大的相互作用力控制,以最好地模拟治疗师的顺应和准确的触觉交互。所展示的机器人特别涵盖了日常生活活动(ADL)所需的相关 ROM,包括靠近躯干,头部和背部的姿势。其具有优化的可操纵性,高标称功率重量比,精确的扭矩控制,其速度足以使患者不受限制地康复的优点,并且在—个设备中具有用于各种实验的多功能性。



**Figure 7.** Multifunctional upper limb exoskeleton rehabilitation robot  
**图 7.** 多功能上肢外骨骼康复机器人

华盛顿大学的 Joel C. Perry 等[19]设计了一种外骨骼康复机器人 CADEN-7 (如图 8)。该外骨骼上肢有七个单轴外转关节。运动包括肩关节的内收/外展、屈/伸和内/外旋;肘关节的复合屈/伸和上/下垂;腕关节的屈/伸和尺桡偏移。该系统对每个关节运动的驱动采用三种配置布置均由闭环电缆组成,电缆上的滑轮缠绕在与旋转轴同心的“关节惰轮”上,为了最大限度地提高传动比,对每个自由度的驱动都采用多级放大的方式[20]。其设计的优点是低惯量、高刚度连杆和可逆向传动。



**Figure 8.** CADEN-7 exoskeleton rehabilitation robot  
**图 8.** CADEN-7 外骨骼康复机器人

国立台湾师范大学的陈春达[21]等开发了一种由气动肌肉执行器(PMA)驱动的 4 自由度上肢外骨骼机器人(如图 9), 以支持肩肘运动。与传统的串联式机械手设计不同, 肩关节设计为球窝关节, 其设计灵感来源于人体解剖学。当空气被压缩到 PMA 中时, PMA 收缩以通过电缆产生单向拉力, 从而转动支撑板以驱动佩戴者的上肢以实现康复锻炼。当空气从 PMA 释放时, 外骨骼机器人利用上肢自重在这些关节上施加扭矩, 除了肩部内部/外部旋转关节, 其中添加了与 PMA 串联的弹簧以提供恢复扭矩, 从而恢复其原始配置。此上肢外骨骼机器人由于使用了 PMA, 因此重量轻、便于携带和由于每个关节的运动范围有限而安全。

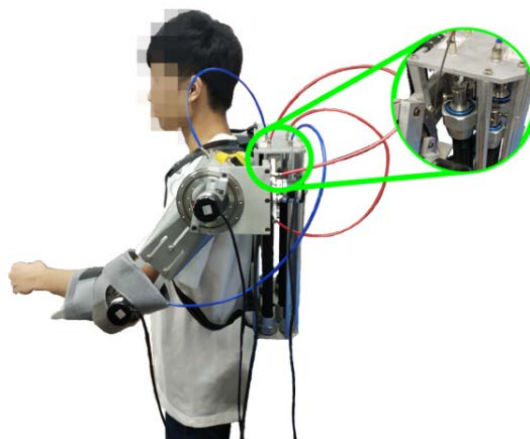


Figure 9. Pneumatic muscle actuator exoskeleton robot  
图 9. 气动肌肉执行器外骨骼机器人

### 3. 上肢康复机器人控制方法研究现状

上肢康复机器人控制方法基本可以分为被动控制与主动控制两种[22]。下面将从这两种控制方法下的主要控制策略来分析各种的特点分析。

#### 3.1. 被动控制

被动控制被用于的康复训练早期, 由康复机器人带动脑卒中患者在小范围内、平稳、多次的按照机器人预先设计好的轨迹进行运动。此时进行的康复训练完全由康复机器人来完成[23]。

##### 3.1.1. PID 控制

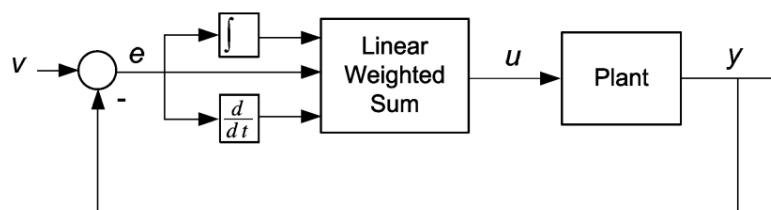


Figure 10. PID control topology  
图 10. PID 控制拓扑结构

1911 年第一个 PID 控制器由 Elmer Sperry 开发 PID。随后, 在 1933 年, 实现了一个具有完全可调功能的前气动控制器, 如今其已经现代控制方法相结合, 使其可以实现参数自定义。PID 控制是一种利用

比例、积分、微分计算出控制量的反馈控制算法。经典 PID 是基于误差反馈控制的基本原理的一种特定而相对简单和简化的实现(如图 10), 其中设定点  $v$  和之间的误差, 以及其微分和积分被用于线性组合以产生控制定律[24]。其有稳定性高、应用广和结构简单的优点, 但很难处理非线性系统和复杂系统。

威斯康星大学的 Tanvir Ahmed 等[25]研究实现了无模型 PID 控制器来操纵复杂的 7 自由度拟人化外骨骼机器人, 为不同的受试者提供各种上肢锻炼。通过实验评估了 PID 控制器的鲁棒性和轨迹跟踪性能。结果表明, 其相比传统 PID 控制其能够有效控制高度非线性、复杂的外骨骼型机器人。

除了单一的 PID 控制, 现在有很多 PID 控制与其他控制方法结合, 从而得到更好的控制效果。例如上海理工大学的胡冰山等[26]设计了一种用于上肢康复训练的可变刚度关节, 其使用反向传播(BP)神经网络 PID 控制策略来控制可变刚度关节的扭矩。实验表明, 这种控制方法可以在低刚度情况下有效提高可变刚度关节的扭矩控制性能。吉隆坡大学的 M. Kamran Joyo 等[27]结合了算法开发了 RAX-1, 它是一个二自由度上肢康复机器人系统, 使用粒子群优化(PSO)和人工蜂群(ABC)优化 2DOF PID 控制系统。实验结果比较, ABC-PID 更加强的鲁棒性, 与常规 PID 控制其超调量较小。

### 3.1.2. 滑模控制

滑模控制(SMC)是一种基于李雅普诺夫第二方法对控制器进行设计的一种方案, 核心思想是设计一个状态反馈控制器, 引入了所谓的“滑模面”概念作为新的状态变量, 重新构造李雅普诺夫函数, 使得新的李雅普诺夫函数随时间而趋近于零。传统 SMC 是处理具有模型不确定性和外部扰动的非线性系统的有效鲁棒控制方法[28], 但其会产生超调现象与抖振现象。所以现在提出高阶滑膜控制、快速终端非奇异滑膜控制来解决这些问题。

前面提及的河南科技大学的上肢康复机器人[14]适用的就是滑膜控制。实验表明, 该机器人在所提出的控制策略下可实现近端关节训练, 具有良好的位置跟踪精度和平滑度, 可以保证被动康复训练的准确性和舒适性, 有助于恢复受损上肢的功能。针对爬行现象, 采用 SMC 加前馈补偿实现气缸低速正弦位移跟踪。跟踪性能和抗干扰能力都很优秀。

正如外骨骼文献中广泛讨论的那样, 由于结构复杂, 实际工程中的动力学参数通常是不确定且难以获得的。针对未知动力学参数和非参数扰动下的 5 自由度上肢外骨骼, 河北工业大学的张高伟等[29]提出了一种迭代学习滑模控制方案。为了解决上述的问题, 采用迭代学习控制(ILC)通过递归学习方法估计时变动态参数, 并重构期望轨迹。针对可能引起的非参数扰动该策略采用 SMC。在迭代变化扰动下获得令人满意的跟踪性能。另一方面, 与现有的 PD-ILC 和 SMC-ILC 相比, 所提方案具有更好的鲁棒性和更高的安全性。其相比传统的滑膜控制不依赖于系统模型的精确性与在不同迭代之间无需相同的初始条件。

### 3.1.3. 模糊控制

模糊控制(FC)是一种基于模糊逻辑的控制方法, 它的发展历程可以追溯到 1965 年, 当时美国加利福尼亚大学控制论专家 L. A. Zadeh 教授提出, 开创了模糊数学的历史。1973 年, L. A. Zadeh 给出了模糊逻辑控制的定义和相关的定理, 开始把模糊逻辑应用于控制领域。模糊控制是模仿人的一种控制, 根据设定值与被控量的偏差、偏差变化和偏差变化的速率进行控制。适用于对难以建模的系统进行鲁棒控制, 并且其控制形式简单、易于实现, 但是最主要的缺点之一就是易产生抖振现象, 为了解决这一问题, 引入了模糊控制与滑模控制相结合[22]。

武汉理工大学的刘权等[30]设计了一种由气动肌肉执行器。为了克服模块化关节重构过程中的动力学模型误差和载荷扰动, 提出了一种基于非线性扰动观测器的非奇异快速终端滑模控制方法, 并形成了位置和力分层控制方法, 以保证软模块化机器人的可控性。实验结果表明, 所提方法能够实现软模块化关节的高精度运动控制, 为患者提供可重构辅助, 提高了康复训练的适应性和依从性。



为了研究解决了与机器人实际使用相关的挑战,例如不确定的非线性动力学,不可用的全状态测量,干扰扭矩的发生。针对这些挑战。克拉福根大学的 Baraka Olivier Mushage 等[31]研究了用于被动康复治疗 5 自由度上肢外骨骼机器人的控制,提出一种自适应非线性控制方案。该方案将高增益状态观测器与动态高增益矩阵和模糊神经网络(FNN)分别用于状态向量和非线性动力学估计。通过仿真结果表明,所提方案响应速度更快,瞬态相位振荡少,跟踪精度高,振幅较小,控制转矩无抖动。

#### 3.1.4. 肌电信号控制

在 19 世纪初,在医学上有用电信号刺激来防止肌肉萎缩,其中就有着肌电信号控制的影子。肌电信号控制(EMG)控制是指通过肌电图是一种用于测量肌肉对神经电刺激的反应的技术。从肌肉和关节周围的皮肤表面获得的肌电信号是运动活动引起的所有肌肉纤维运动单位动作电位的电活动的总和测量人体肌肉电信号[32],将其转化为机器人或其他设备的控制信号,从而实现对机器人或其他设备的控制。肌电信号控制有着较好的生物相容性与人机交互性的优点,同时也有着信号弱、噪声大与信号难以分析的缺点。

中风康复中存在相当大的环境不确定性,包括不确定的机器人动力学、不必要的用户反射以及最重要的是用户意图轨迹的不确定性。因此,开发透明、稳定和大规模的康复外骨骼机器人具有挑战性。马什哈德费尔大学的 Ali Foroutannia 等[33]提出了一种自适应模糊阻抗控制器(AFIC)和卷积神经网络(CNN),它使用肌电信号进行人类意图的早期检测,并更好地与外骨骼机器人集成。EMG 在这里特别有效,因为它反映了人类比其他机械传感器更快地移动的意图。而且实验结果表明,尽管行走速度变化存在不确定性,但所提方法仍能成功获得机器人关节的扭矩。

### 3.2. 主动控制

当患者有一定的活动能力时可以使用主动控制来进行康复训练,主动控制是主动训练指的是人体手臂发力,康复机器人提供辅助或阻力的控制[34]。这种控制方式的康复机器人的必须根据患者病情的不同进行相应的调整,实现个性化的训练[35]。而且有研究表明短时间的主动运动训练比被动运动训练更能有效地改善运动表现和大脑皮层的重组[36]。

#### 3.2.1. 阻抗控制与导纳控制

1984 年 Neville Hogan [37]提出了阻抗控制,发展到现在一种是基于测量的位移变化来产生相应的阻抗力的阻抗控制,另一种则是基于测量的外部力来产生位置修正量的阻抗控制即导纳控制[22]。两者都可以表现为柔顺性,但导纳控制更易实验。

为了解决家庭康复设备数量少,涉及结构多,价格也很高。东南大学的白静等[38]研究设计了一种基于家庭的 3 自由度上肢康复机器人。提出了基于反步自适应模糊阻抗控制方法,并建立了李雅普诺夫方程来验证控制方法的稳定性。实验结果表明,所提控制器具有良好的动态质量和跟踪性能。它可以消除不确定性对系统的影响,使非线性控制系统具有较强的鲁棒性和适应性。

为了提高机器人辅助协同康复训练的有效性,南京航空航天大学吴庆聪等[39]提出了一种平面上肢康复机器人的可变导纳控制策略。与现有的协同控制器相比,其贡献在于基于人臂刚度估计和延时控制方法的导纳特性和交互柔顺度的调节,有助于提高机器人辅助康复训练的有效性。

#### 3.2.2. 自适应控制

自适应控制最初由 Draper 和 Li 在 1951 年提出用于解决不确定的内燃机达到最佳能。1960 年 Li 和 Van Der Velde 提出的自适应控制系统,它的控制回路中用一个极限环使参数不确定性得到自动补偿。现在多用于航空航天与飞行器控制方面。自适应控制是一种通过实时改变控制器参数或结构以动态适应系

统模型变化或外界干扰的控制策略。其优势在于适应参数不确定性，能够处理结构和环境的不确定性。

临床研究表明，将患者的积极意图纳入康复训练有助于促进治疗的效果。南京航空航天大学吴庆聪等[40]一种自适应神经合作控制策略，以实现基于意图的人协同康复训练。通过采集肌电信号，再用鲁棒自适应滑模控制器。保证了不确定的内部位置控制回路的准确性和稳定性。实验研究表明，所提控制策略在调节训练过程中的交互顺应性和协作过程方面具有显著潜力。

目前大多数康复机器人控制器会提供过多的辅助力，只关注患者的位置跟踪性能，而忽略了患者的交互力情况，导致无法准确评估患者的真实运动意图，难以激发患者的主动性，从而对患者的康复结果产生负面影为此，浙江工业大学的胡洋等[41]提出一种基于受试者任务表现和脉冲的模糊自适应被动控制策略。通过实验表明，这种控制策略不仅能提高受试者在康复过程中的主动性，确保训练过程中的安全，还能增强受试者的运动学习能力。然而，其还有一定的局限性，因为仅招募健康受试者进行实验测试以验证所提出的控制器的有效性。

### 3.2.3. 智能控制

在人工智能发展如此快速的今天，它在很多方面都发挥重要作用。在康复机器人方面与神经网络相结合来达到更优的控制。

伊斯兰阿扎德大学 Amir Razzaghian 等[42]研究了一种新的基于分数阶 Lyapunov 的鲁棒控制器，该控制器基于模糊神经网络补偿器，用于外骨骼机器人系统。首先，设计了一种有限时间分数阶非奇异快速终端滑模控制(FONFTSMC)方法；其次，构建 FNN 算法来近似模型不确定性和外部扰动；然后，利用李雅普诺夫稳定性定理证明了闭环控制系统的有限时间稳定性，并推导了自适应定律。所提出的基于模糊神经网络的 FONFTSMC 保证了外骨骼机器人轨迹跟踪的有限时间收敛性和对不确定性的鲁棒性。数值仿真结果证实了其在高频轨迹上的控制精度和有限时间收敛性，与其他控制器相比，具有更高的性能、快速响应、消除抖动和有限时间收敛性。

## 4. 总结与展望

从以上来看，上肢康复机器人的结构与控制多种多样，康复训练的技术也越来越多样与成熟，但其面临的难题与挑战，这同时也是未来上肢康复机器人的发展的方向。下面是一些上肢康复机器人的难点与发展趋势：

(1) 末端执行器式上肢康复机器人虽然结构简单，容易制造，由于其与肢体关节运动学不匹配的原因，使得很难对多个关节同时进行控制，而且运动范围受限。所以未来这种形式的上肢康复机器人应考虑往多个关节控制、扩大其运动范围的方向发展。

(2) 外骨骼式相比末端执行器式具有更大的活动范围、穿戴舒适等优点。但其由于没有外部框架进行支撑，使得很难对电机、传感器进行安装。如果其安装的机械关节与生物关节不匹配，其可能会对患者造成二次伤害。未来的设计应该考虑不同的上肢关节的长度与合理的支撑。

(3) 每种控制策略都有其优势的地方，控制策略应该根据所应用的场景进行有选择的混合使用，扬长避短。充分发挥各个控制策略的优势，满足患者需求。

(4) 在上肢康复机器人的设计与控制发展的同时，其评价指标也要跟得上。评价方法不应拘束在位置、轨迹、力等。也可以用生物的电信号、各个关节对康复运动的贡献等来评价康复训练的效果，未来应该完善康复训练的评价指标。

随着人口老龄化与康复治疗师的不足，未来上肢康复机器人需求巨大，设计更优、控制更合理、评价更准确的上肢康复机器人无疑是未来的热点。在未来，康复机器人将成为我国康复养老的重要组成部分。低成本的远程康复装置将有效地将康复训练带入家庭和社区，实现高效的康复服务。这样，人们就

能在家中或社区内接受康复训练, 无需前往医院或康复中心, 这将大大提高康复服务的普及性和便利性, 让科技更好造福社会。

## 基金项目

国家自然科学基金(No.61963007), 深圳市科技研发资金基础研究项目(No. JCYJ20210324122200002)。

## 参考文献

- [1] 王杰秀, 安超. 全球老龄化: 事实、影响与政策因应[J]. 社会保障评论, 2018, 2(4): 14-30.
- [2] 第七次全国人口普查结果: 中国人口 14.1178 亿[J]. 新民周刊, 2021(17): 35.
- [3] 王陇德, 彭斌, 张鸿祺, 等. 《中国脑卒中防治报告 2020》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2022, 19(2): 136-144.
- [4] 王亚楠, 吴思缈, 刘鸣. 中国脑卒中 15 年变化趋势和特点[J]. 华西医学, 2021, 36(6): 803-807.
- [5] 陈礼静, 李娟, 储静. 康复机器人在卒中患者中的应用[J]. 上海护理, 2023, 23(3): 72-76.
- [6] 石男强, 刘刚峰, 郑天骄, 等. 下肢康复机器人的研究进展与临床应用[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 43-53.
- [7] Dorrance, A.M. and Fink, G. (2015) Effects of Stroke on the Autonomic Nervous System. *Comprehensive Physiology*, **5**, 1241-1263. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140016>
- [8] 喻洪流. 康复机器人: 未来十大远景展望[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(8): 900-902.
- [9] 余灵, 喻洪流. 上肢康复机器人研究进展[J]. 生物医学工程学进展, 2020, 41(3): 134-138, 143.
- [10] 冷冰, 李旺鑫, 刘斌. 上肢康复机器人研究及发展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4311-4322.
- [11] Nelson, C.A., Nouaille, L. and Poisson, G. (2020) A Redundant Rehabilitation Robot with a Variable Stiffness Mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, **150**, Article ID: 103862. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103862>
- [12] Passon, A., Schauer, T. and Seel, T. (2022) Inertial-Robotic Motion Tracking in End-Effector-Based Rehabilitation Robots. *Frontiers in Robotics and AI*, **7**, Article 554639. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.554639>
- [13] Fraile, C.J., Pérez-Turiel, J., Baeyens, E., et al. (2016) E2rebot: A Robotic Platform for Upper Limb Rehabilitation in Patients with Neuromotor Disability. *Advances in Mechanical Engineering*, **8**, 1-13. <https://doi.org/10.1177/1687814016659050>
- [14] Li, L.Y., Han, J., Li, X., et al. (2022) A Novel End-Effector Upper Limb Rehabilitation Robot: Kinematics Modeling Based on Dual Quaternion and Low-Speed Spiral Motion Tracking Control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **19**, 1-15. <https://doi.org/10.1177/17298806221118855>
- [15] Dong, M.J., Fan, W., Li, J. and Zhang, P.F. (2022) Patient-Specific Exercises with the Development of an End-Effector Type Upper Limb Rehabilitation Robot. *Journal of Healthcare Engineering*, **2022**, Article ID: 4125606. <https://doi.org/10.1155/2022/4125606>
- [16] Lo, H.S. and Xie, S.Q. (2012) Exoskeleton Robots for Upper-Limb Rehabilitation: State of the Art and Future Prospects. *Medical Engineering & Physics*, **34**, 261-268. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2011.10.004>
- [17] Brihmat, N., Loubinoux, I., Castel-Lacanal, E., et al. (2020) Parameters Obtained with the ArmeoSpring for Upper-Limb Assessment after Stroke: A Reliability and Learning Effect Study for Guiding Parameter Use. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, **17**, Article No. 130. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00759-2>
- [18] Zimmermann, Y., Forino, A., Riener, R. and Hutter, M. (2019) ANYexo: A Versatile and Dynamic Upper-Limb Rehabilitation Robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **4**, 3649-3656. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2926958>
- [19] Perry, J.C., Rosen, J. and Burns, S. (2007) Upper-Limb Powered Exoskeleton Design. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **12**, 408-417. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2007.901934>
- [20] Sanjuan, J.D., Castillo, A.D., Padilla, M.A., et al. (2020) Cable Driven Exoskeleton for Upper-Limb Rehabilitation: A Design Review. *Robotics and Autonomous Systems*, **126**, Article ID: 103445. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103445>
- [21] Chen, C.T., Lien, W.Y., Chen, C.T. and Wu, Y.C. (2020) Implementation of an Upper-Limb Exoskeleton Robot Driven by Pneumatic Muscle Actuators for Rehabilitation. *Actuators*, **9**, Article 106. <https://doi.org/10.3390/act9040106>
- [22] 刘冰, 李宁, 于鹏, 等. 上肢康复外骨骼机器人控制方法进展研究[J]. 电子科技大学学报, 2020, 49(5): 643-651.
- [23] 朱雪枫. 康复机器人上肢运动系统控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [24] Han, J. (2009) From PID to Active Disturbance Rejection Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**,

- 900-906. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011621>
- [25] Ahmed, T., Islam, M.R., Brahmi, B. and Rahman, M.H. (2022) Robustness and Tracking Performance Evaluation of PID Motion Control of 7 DOF Anthropomorphic Exoskeleton Robot Assisted Upper Limb Rehabilitation. *Sensors*, **22**, Article 3747. <https://doi.org/10.3390/s22103747>
- [26] Hu, B.S., Mao, B.H., Lu, S. and Yu, H.L. (2022) Design and Torque Control Base on Neural Network PID of a Variable Stiffness Joint for Rehabilitation Robot. *Frontiers in Neurorobotics*, **16**, Article 1007324. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1007324>
- [27] Joyo, M.K, Raza, Y., Ahmed, S.F., *et al.* (2019) Optimized Proportional-Integral-Derivative Controller for Upper Limb Rehabilitation Robot. *Electronics*, **8**, Article 826. <https://doi.org/10.3390/electronics8080826>
- [28] Qiao, L. and Zhang, W. (2020) Trajectory Tracking Control of AUVs via Adaptive Fast Nonsingular Integral Terminal Sliding Mode Control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **16**, 1248-1258. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2949007>
- [29] Zhang, G.W, Wang, J., Yang, P. and Guo, S.J. (2021) Iterative Learning Sliding Mode Control for Output-Constrained Upper-Limb Exoskeleton with Non-Repetitive Tasks. *Applied Mathematical Modelling*, **97**, 366-380. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.03.049>
- [30] Liu, Q., Liu Y., Zhu, C., *et al.* (2021) Design and Control of a Reconfigurable Upper Limb Rehabilitation Exoskeleton with Soft Modular Joints. *IEEE Access*, **9**, 166815-166824. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3136242>
- [31] Mushage, B.O., Chedjou, J.C. and Kyamaky, A.K. (2017) Fuzzy Neural Network and Observer-Based Fault-Tolerant Adaptive Nonlinear Control of Uncertain 5-DOF Upper-Limb Exoskeleton Robot for Passive Rehabilitation. *Nonlinear Dynamics*, **87**, 2021-2037. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-3173-7>
- [32] Rodríguez-Tapia, B., Soto, I., Martínez, D.M. and Arballo, N.C. (2020) Myoelectric Interfaces and Related Applications: Current State of EMG Signal Processing—A Systematic Review. *IEEE Access*, **8**, 7792-7805. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963881>
- [33] Foroutannia, A., Akbarzadeh-T, M.R., Akbarzadeh, A. and Tahamipour-Z, S.M. (2023) Adaptive Fuzzy Impedance Control of Exoskeleton Robots with Electromyography-Based Convolutional Neural Networks for Human Intended Trajectory Estimation. *Mechatronics*, **91**, Article ID: 102952. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2023.102952>
- [34] 刘鹏, 葛小青, 李宇, 等. 上肢康复机器人主动康复训练控制策略[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(4): 570-576.
- [35] 侯增广, 赵新刚, 程龙, 等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1765-1779.
- [36] Lotze, M., Braun, C., Birbaumer, N., Anders, S. and Cohen, L.G. (2003) Motor Learning Elicited by Voluntary Drive. *Brain*, **126**, 866-872. <https://doi.org/10.1093/brain/awg079>
- [37] Hogan, N. (1985) Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II—Implementation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **107**, 8-16. <https://doi.org/10.1115/1.3140713>
- [38] Bai, J., Song, A.J., Wang, T. and Li, H.J. (2019) A Novel Backstepping Adaptive Impedance Control for an Upper Limb Rehabilitation Robot. *Computers & Electrical Engineering*, **80**, Article ID: 106465. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106465>
- [39] Wu, Q.C. and Chen, Y. (2023) Variable Admittance Time-Delay Control of an Upper Limb Rehabilitation Robot Based on Human Stiffness Estimation. *Mechatronics*, **90**, Article ID: 102935. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2022.102935>
- [40] Wu, Q.S. and Chen, Y. (2020) Development of an Intention-Based Adaptive Neural Cooperative Control Strategy for Upper-Limb Robotic Rehabilitation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **6**, 335-342. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3043197>
- [41] Hu, Y., Meng, J.Y., Li, G.N., *et al.* (2023) Fuzzy Adaptive Passive Control Strategy Design for Upper-Limb End-Effector Rehabilitation Robot. *Sensors*, **23**, Article 4042. <https://doi.org/10.3390/s23084042>
- [42] Razzaghian, A. (2022) A Fuzzy Neural Network-Based Fractional-Order Lyapunov-Based Robust Control Strategy for Exoskeleton Robots: Application in Upper-Limb Rehabilitation. *Mathematics and Computers in Simulation*, **193**, 567-583. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.10.022>