

第二十六届中国机器人及人工智能大赛

机器人创新项目研究报告

作品编号:

作品名称:

健康“手”护者——主从一体外骨骼康复仪

填写日期:

2024-06-06

目 录

第 1 章 项目概述	1
1.1 项目背景	2
1.2 国内外研究现状	2
1.3 作品拟解决的问题	4
1.4 解决思路	5
第 2 章 项目研究内容和技术路线	7
2.1 表面肌电信号采集和处理技术	7
2.2 智能化分析方法	8
2.3 个性化训练实现方法	9
第 3 章 系统实现及作品展示	10
3.1 主控选择	10
3.2 硬件搭建	10
3.3 软件搭建	11
3.4 作品实物展示	11
第 4 章 总结	13
4.1 特色与创新	13
4.2 项目的应用前景和社会价值	15
4.3 项目存在的问题	15
4.4 改进方向	16
参考文献	17

第 1 章项目概述

本作品结合了手部和肘关节的功能，将手部外骨骼和肘关节外骨骼结合起来，形成了一款多关节协同康复外骨骼设备。该设备采用了三维打印技术和高强度韧性树脂材料，具有高可靠性、便携性和低成本快速生产的特点。

本项目研制的设备，具备手部和肘关节协同训练的特点能提高康复效率，并采用了多种科学方法，例如多混合感知技术、FES 技术等。通过采集生物信息，实现智能化监控及个性化训练方案定制的功能。此外，本项目通过建立生物信息学模型，对患者的运动表现和肌肉协调情况进行分析和预测，为制定个性化康复方案提供科学依据。

目前，该设备已完成初步研制，并取得了较好的效果，未来将在临床康复中应用，同时还可应用于康复训练、医疗保健和生产制造等领域。在未来的研发中，将不断改进和完善该设备，以提高其实用性和使用体验，并积极探索多模态传感器融合技术和人工智能技术在康复外骨骼领域的应用，实现更加智能化的康复辅助。

每个人的身体状况和康复需求都是独一无二的，我们坚信通过这种个性化的康复训练，我们能够帮助更多需要康复的人实现更好的康复效果和自我成长。

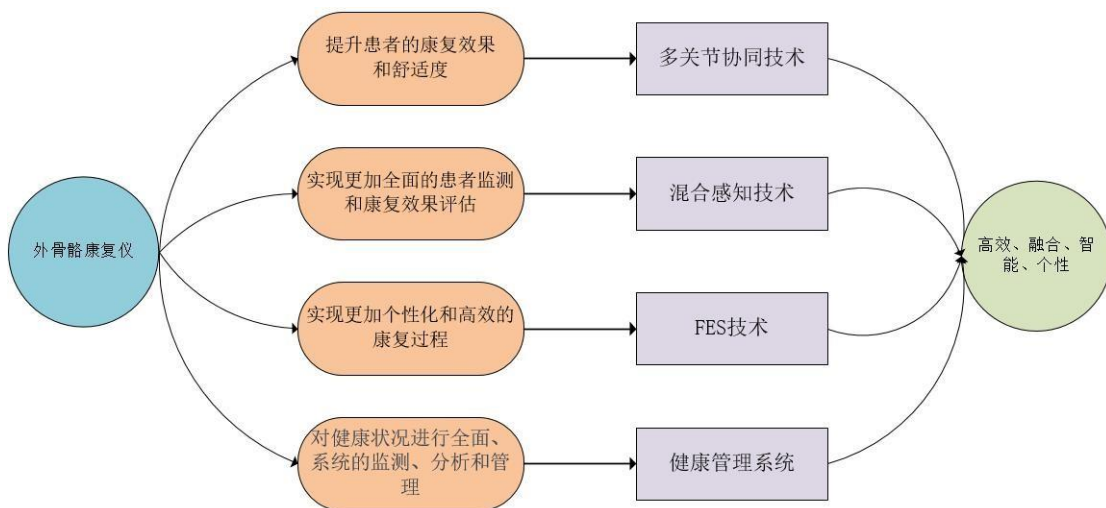


图1 系统功能及关键技术

1.1 项目背景

党的二十大提出，“坚持面向人民生命健康，加快实现高水平科技自立自强”，可见以科技辅助医疗，守护人民健康是未来医疗事业的发展方向。研究表明，神经系统疾病（如中枢神经损伤、外周神经损伤、神经卡压）、骨骼肌肉疾病（如外伤）、术前术后的动静脉血液循环和淋巴回流不畅、疤痕组织、痉挛等均会导致手功能障碍，使患者出现偏瘫现象。传统的康复治疗手段主要通过医护人员手动或使用一些简单设备进行一对一训练，患者无法实现多个关节同时执行全方面的康复锻炼。本文基于 ESP32 设计了一款医疗康复机器人手，用以帮助手部瘫痪的患者进行康复治疗。现已有外骨骼康复机器人存在以下不足：

传感器技术不足：外骨骼传感器技术的缺陷导致外骨骼无法准确感知用户的动作和环境变化，难以实现自适应控制^[1]。

数据处理和分析能力不足：现有外骨骼的数据处理和分析能力不够，难以实现对用户的数据进行全面、精确的分析和处理。

体积过大：一些外骨骼设备较为笨重，穿戴不方便，使用时需要消耗更多的能量，不利于康复训练的长期进行，尤其对于身体虚弱的患者来说更加困难。

功能受限：一些外骨骼设备只能针对单个关节进行康复训练，无法实现多关节的协同运动，对于患者的康复训练效果有一定的局限性。

控制复杂：一些外骨骼设备的控制系统比较复杂，需要进行多次的调试和校准，对于操作人员的专业水平有一定的要求。

成本较高：外骨骼设备的制造和研发成本较高，导致其价格较为昂贵，不利于普及和推广^[2]。

1.2 国内外研究现状

传统偏瘫患者治疗方式，偏瘫患者康复训练需由专业的医生现场指导进行，存在价格昂贵、患者往返医院麻烦、医生专业技术缺乏、医生人手不足等问题，为弥补传统偏瘫患者治疗方式的缺陷，国内外许多高校和医疗机构灵活运用机器人技术，使得康复医疗得到快速发展。

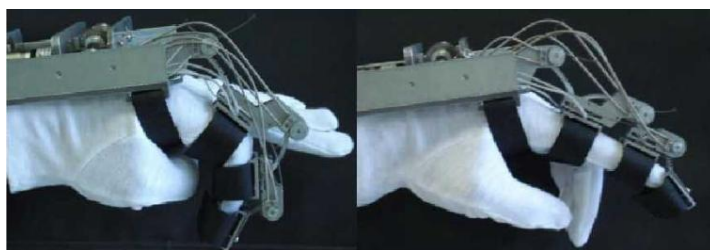


图 2 哈尔滨工业大学手指康复机械手

哈尔滨工业大学研制了一款单个手指的机械手，如图 2 所示。该设备利用电机通过齿条带动指节弯曲，实现康复手指的运动，但是该设备主要由钢丝构成，舒适度不够，且工作时杂乱。

香港理工大学研制的 Hand of Hope 手部外骨骼是一款比较成熟的商业化首部康复机器人，如图 3 所示[6]。该设备在手指背侧布置刚性连杆，以五个直线点击独立驱动每根手指，通过患侧处的肌电电极检测患者运动意图，从而控制外骨骼辅助患手做出相应动作。

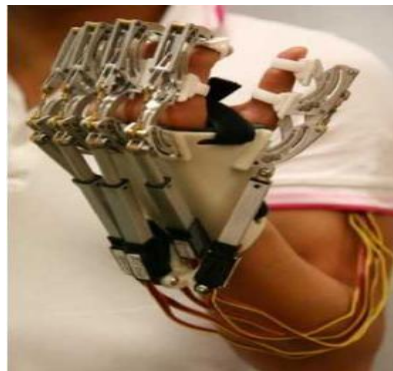


图 3 Hand of Hope 原型机

日本岐阜大学研制的手部运动辅助装置，如图 4 所示[5]。该设备可以执行镜像康复治疗锻炼模式的任务，但其机构复杂，造价昂贵，不适用于大众，且无法与手臂康复设备协同工作[6]。

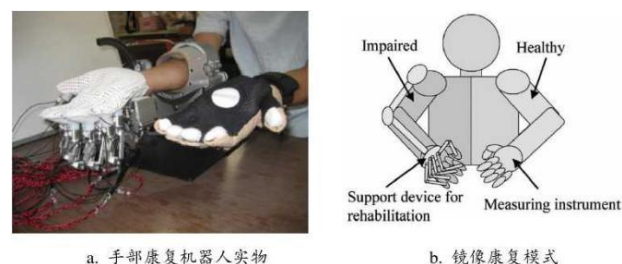


图 4 岐阜大学手康复机器人

哈佛大学研制的气功柔性康复手套[7]，如图 5 所示。该设备采用气功驱动方式驱动手指运动，穿戴舒适，但是噪声大，驱动患者手指运动力度不足。



图 5 哈佛大学气功手套

瑞士的苏黎世大学设计的上肢康复机器人如图 6 所示。该设备具备六个自

由度，可以辅助患侧肩、肘关节执行复合康复锻炼，缺点是患者参与康复训练时需要长期保持固定的姿势，易给患者带来疲劳感。



图 6 ARMin 康复机器人

1.3 作品拟解决的问题

本作品对现有外骨骼康复设备，做出的改变是采用更加先进的传感器技术，提高数据处理和分析能力，用户反馈机制的建立，控制算法的优化，采用轻量化材料和先进的制造工艺。与传统的康复治疗方式相比，该医疗康复机器手具有自主性、效率高、精度高、智能化程度高等优势，能够为患者提供更加舒适和安全的康复治疗体验。

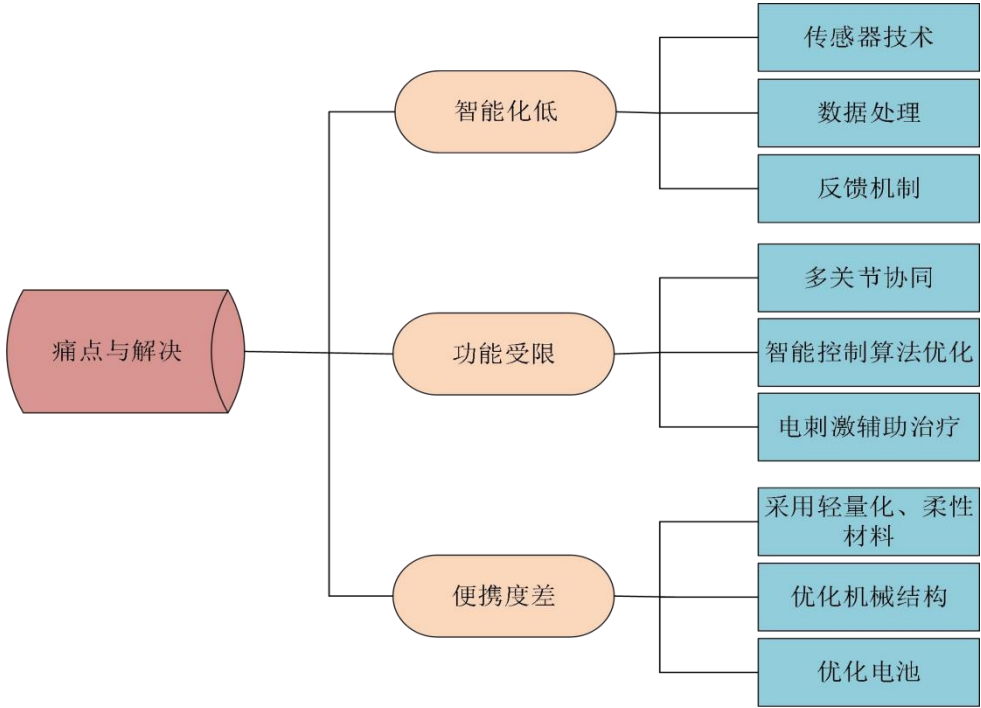


图7 现有外骨骼康复设备痛点问题与本作品解决思路概括

1.4 解决思路

1.4.1 混合感知技术

本作品使用了更多种类的传感器，除了惯性测量单元和压力传感器还使用了肌电传感器获取 EMG 信号以便更全面、准确地感知用户的动作和环境变化。

采用混合感知技术^[3]：利用多传感器融合技术，将多种传感器的数据进行融合，以便更全面、准确地感知用户的动作和环境变化，进一步提高外骨骼的智能化程度。

优化传感器位置和数量：合理优化传感器的位置和数量，以便更好地感知用户的动作和环境变化。在外骨骼的关键部位增加传感，提高外骨骼的控制精度和稳定性。

1.4.2 数据处理和分析能力

使用云计算和大数据分析技术实现对外骨骼数据的实时处理、存储、分析和应用。通过对用户的动作数据、环境数据、生理数据等信息进行收集和分析，可更加全面、精确地了解用户的需求和行为，从而优化外骨骼的控制策略和功能设计。

1.4.3 用户反馈机制的建立

结合上述两点进而根据患者的特征和康复需求，自动调整康复训练计划和控制运动范围和运动速度等，建立反馈机制，从而实现个性化训练，提高用户的使用体验和满意度，促进外骨骼技术的应用和普及。

1.4.4 轻量个性化

本作品采用 3D 打印技术和树脂高强度铝合金等具有较轻的重量和较高的强度的材料制造外骨骼的骨架和关键部件，可以实现外骨骼的快速制造和定制化设计，减少生产成本和时间，并且可以根据用户的身体特征和需求进行个性化设计。

此外，本作品由尼龙搭扣的臂套和传统手套组成，其力传感器与控制主板处于外骨骼之外。该机器人的外骨骼是完全柔软的，这大大提高了安全系数，且质量仅有 100 g，携带方便，可用于居家环境下的康复锻炼，辅助腕关节康复运动最重要的是，该机器手的控制系统简单易用，成本低廉，具有较好的推广和普及价值。。

1.4.5 控制算法的优化

本作品设计了一个十二自由度搭配肌电传感器捕捉上肢动作信息。控制肘关节和手关节的运动，针对其实时控制本作品采用 Real-Time Operating System

(RTOS) 系统架构，多线程调度任务，以满足多关节的实时协同和稳定性。

采用 PD 控制保证系统对外部干扰的抵抗能力和稳定性，实现基础运动的精准控制，并通过模糊化的控制规则来实现对系统的控制，使其具有很好的鲁棒性和适应性^[4]。二者结合可以在保证基础控制精度和稳定性的同时，实现关节的协同控制，提高系统的性能和使用效果满足用户的需求和期望。

第 2 章项目研究内容和技术路线

本项目的研究内容是设计和实现一种可穿戴式上肢外骨骼，旨在帮助肢体功能障碍人士恢复上肢的运动能力。

2.1 表面肌电信号采集和处理技术

为准确识别人体运动意图，增强外骨骼人机交互性，需引入生物信号传感器。相比于脑电、眼电等生理信号，表面肌电信号因具有无创伤性和低成本的特点，得到了广泛的应用。本作品选用表面肌电信号采集系统，将电极片贴于人体上肢相应肌肉表面，通采集 sEMG 信号后可经 CAN 总线或 USB 接口将信号传输进数据采集模块或 PC 上位机。

sEMG 信号在采集过程中会受到各种因素影响采集效果，为此需要进行必要的滤波去噪处理。首先，使用数字滤波器（带通滤波器）对肌电信号进行滤波，以保留有效信号同时去除噪声。其次，使用卡尔曼滤波，使用肌电的测量信号作为观测量，以及肢体运动模型作为系统状态量，通过状态预测和观测更新来实现姿态的估计。同时，为了减少测量噪声的影响，还通过卡尔曼滤波的过程模型和观测模型来进行滤波和去噪处理。

根据信号与系统中学习的傅里叶变换，采集到的 ADC 信号脉冲是可以分解成无数频率不同的正弦/余弦曲线的，也就是噪声。如果将数字地与模拟地直接相连，这些噪声将会进入模拟端，对模拟量产生影响。所以，本作品将模拟地和数字地进行隔离（如图 9），并采用低噪声、高增益、高带宽的 OPA2350 运算放大器高速处理信号，原理图如图 8 所示。

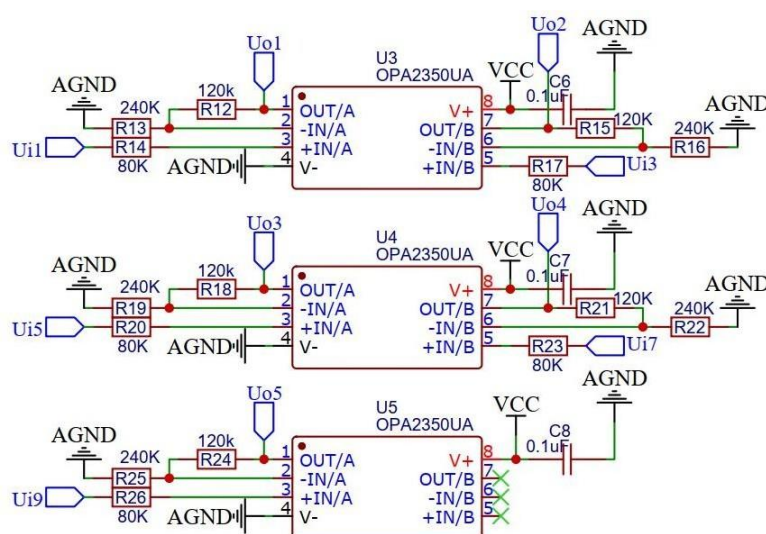


图 8 OPA2350 运放原理图

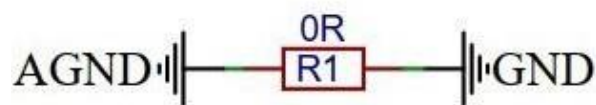


图 9 地隔离原理图

降噪前后的表面肌电信号如图 10 所示：

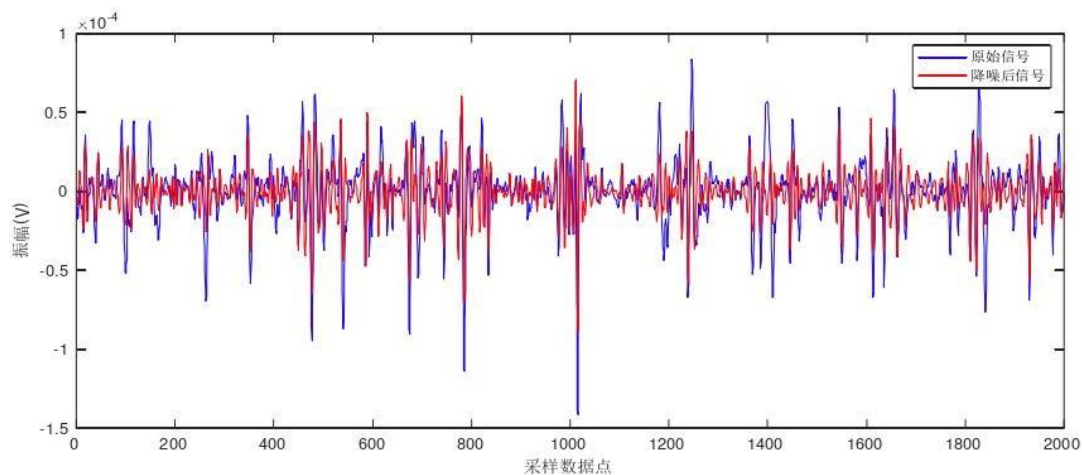


图 10 降噪前后的表面肌电信号

2.2 智能化分析方法



图 11 数据采集实



图 12 实验所用的前臂姿势

上图所示为实验采集场景收集数据图，本作品有效建立分类模型的反馈功能，其智能化分析方法步骤如下：

(1) 数据集分类。将数据集分成训练集、验证集和测试集，其中训练集用于训练模型，验证集用于调整模型的超参数，测试集用于评估模型的性能。

(2) 训练模型。在训练模型时，将训练集输入到模型中，并根据模型的输出与实际结果的差异来调整模型的权重和偏置等参数。对模型进行多轮训练，提高模型的准确性和泛化能力。

(3) 验证模型。在训练过程中，使用验证集来评估模型的性能，并根据评估结果肌电信号、心电信号、血氧饱和度来调整模型的超参数。

(4) 测试模型。在模型训练完成后，需要使用测试集来评估模型的性能。通常使用指标如准确率、召回率、F1 得分等来评估模型的性能。

2.3 个性化训练实现方法

采用 **Lovett 肌力分级**和 **FES 结合**，来评估患者肌肉力量，将肌肉分为 0 到 5 级，针对不同肌力等级的患者采用不同的康复训练模式，肌力分级情况如表 1。

表 1 Lovett肌力分级

肌力等级	描述	康复模式
0	肌肉完全无收缩能力	被动模式
1	肌肉有轻微收缩，但不能引起关节运动	
2	肌肉收缩可以使关节在减重条件下进行全范围运动	主动模式（助力）
3	关节可以抵抗重力进行全范围运动，但不能抵抗外加阻力	
4	关节可以抵抗重力及一定阻力进行全范围运动	主动模式（阻力）
5	肌肉力量正常	

通过本作品实现针对性的肌肉力量训练，全方位锻炼肌肉并提升力量，同时记录患者康复数据和进展情况，实时监测和评估患者康复情况，并根据患者实际情况制定个性化的康复训练计划，以最大限度地提高康复效果和患者生活质量。通过模型的反馈功能，可以避免因个体身体差异或状态不稳而导致的信息传输错误，并实现按需辅助（AAN）来帮助患者完成主动的运动康复训练。在部分分离期和分离期，患者有一定的肌力支撑手臂进行运动，但不同患者的肌力水平差距较大，随着康复的进行，患者的肌力也会逐渐增大，外骨骼需要实时判断患者完成康复任务的能力来辅助患者完成康复训练。

第 3 章系统实现及作品展示

3.1 主控选择

ESP32 作为主控具有高性能、低功耗、多种接口、丰富的开发资源和成本优势等优点，适用于各种物联网应用和嵌入式系统设计。本作品的主控使用 ESP32 作为主控，其核心板有以下特点：

（1）**高性能：**ESP32 是一款双核心、高性能的微控制器，具有更快的处理速度和更强的计算能力。

（2）**低功耗：**ESP32 采用了先进的功耗管理技术，在保证高性能的同时，能够实现低功耗运行，从而延长设备的使用寿命。

（3）**成本优势：**ESP32 的成本相对较低，相比其他高性能微控制器，具有一定的成本优势，能够降低设备的总成本。

3.2 硬件搭建

在硬件搭建方面，我们使用了 ESP32 开发板作为主控板，通过外接舵机、电池等组成了机器手的硬件系统。在机器手的设计中，我们考虑了机械结构的可靠性、稳定性和操作便捷性，同时也注重了外观美观和符合人体工程学。具体硬件组成如下：

ESP32 开发板：作为机器手的主控板，负责控制电机的运行、接收传感器数据等。

500KG/CM 工业级直流舵机：用于驱动机器手的运动，通过控制舵机的正反转，实现手指的开合。

锂电池：选用锂电池作为外骨骼的电源，具有体积小、能量密度高等特点，可以满足机器手长时间运行的需求。

压力传感器和角度传感器：我们在机器手中设置了这两种传感器，用于感知手指的运动和手指对物体的力度，进而根据传感器数据控制机器手的运动。

干电极电传感器和血氧模块：通过非侵入性的方式监测患者血氧饱和度、肌电信号和脉率等，以帮助医护人员了解患者的生理状态和康复进展情况，以便及时调整康复计划和治疗方案，以最大程度地提高康复效果和患者的生活质量。

电刺激模块：通过对患者的手部进行电刺激，促进神经功能恢复，提高康复效果。

机械结构：机器手的机械结构由 3D 打印的手指、外壳和电机支架等组成，采用 PLA 材料打印，具有良好的稳定性和耐用性。

3.3 软件搭建

数据获取方面，我们采用了多混合感知技术，使用力传感器和倾角传感器获取机器人的姿态数据，并采用卡尔曼滤波算法对数据进行处理，以提高机器人姿态信息的准确性和稳定性。处理后的姿态信息将上传至控制端和服务端，以供控制器使用。这种方法不仅可以提高系统的精度和鲁棒性，还能适应不同情况下的数据采集需求。

外骨骼控制方面，采用 RTOS 实时控制系统对机器人的运动过程进行实时监控和控制，确保机器人的稳定性和安全性。系统采用任务调度、中断处理、优先级管理等技术手段来避免任务调度的延迟和资源占用等问题，保证了系统的稳定性和可靠性，同时也能实现多关节的协同控制。

在用户界面设计方面，我们为系统提供了方便用户使用和操作的功能，包括输入训练任务、查看康复数据和进行交互等。通过友好的界面设计和操作流程，使得用户能够更加直观地使用系统，提高其参与度和积极性。我们还将不断优化和完善用户界面，以满足不同用户的需求和反馈。

3.4 作品实物展示

在硬件搭建完成后，我们进行了功能测试和调试，确保机器手的运动稳定、控制准确，并满足康复治疗的需求。



图 13 作品总览图

系统测试控制方式采用主从一体控制，控制信号为：2ms 脉冲(0.5ms-2.5ms 脉宽/50Hz)，舵机旋转角度可达 180°，但在控制板上可以限定其转动力度和角度，可根据患者的康复情况和身体状况进行调整力度，以防止患者受到过度的拉伸和扭曲，引起肌肉疲劳或疼痛，以确保患者安全和康复效果。



图 14 手指 3D 模型

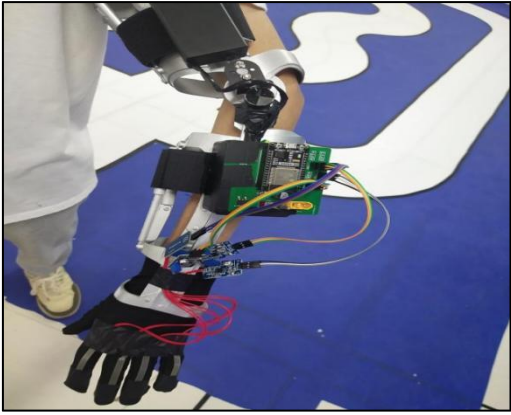


图 15 健侧外骨骼展示图

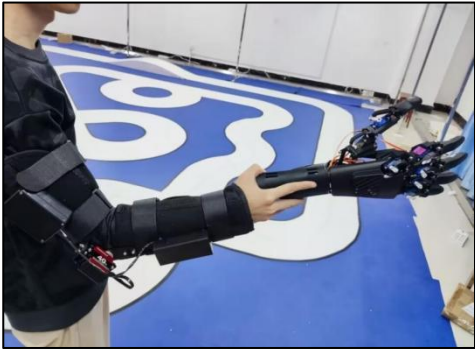


图 16 患侧外骨骼展示



图 17 应用平台

第 4 章总结

4.1 特色与创新

4.1.1 特色

1、高智能特性

这个机器手具备高度智能化的特点。其表面信号采集系统和电刺激技术可以精准地识别人体运动意图，并提高外骨骼人机交互性。采集的信号经过数字滤波器和卡尔曼姿态滤波进行处理，有效去除噪声，提高信号质量。同时，该机器手主从一体，包括独立的控制单元和康复手套两个部分，通过无线通信实时接收康复手套的姿态信息，根据预设康复方案控制机器手的动作，帮助患者完成肌肉训练和康复治疗，提高肌肉力量和控制能力。

此外，我们建立了数据模型，通过对康复患者的运动学参数进行测量和分析，建立了人机交互模型和动力学模型，可以更加准确地评估患者的康复进展，并及时调整康复方案，实现个性化的康复治疗。同时，这些模型也可以作为康复机器手的控制基础，使其能够更加精准地控制机器手的动作，从而达到更好的治疗效果。

2、通用性

本作品利用智能算法和传感器等技术，实现自适应调节，可适用于不同人群的康复治疗，包括不同类型的肌肉和关节损伤、不同年龄段和不同程度的患者。同时，该机器手不仅作为康复辅助设备，还可用于康复患者日常生活中的握力操作等，具有广泛的应用价值。其轻量化设计和简单易用的操作界面，可提高康复治疗的舒适性、便捷性和效率。

3、使用与升级灵活

这个机器手的设计具有灵活性和可升级性，使其可以适应不同的康复治疗需求。通过更换不同的康复手套，该机器手可以适应不同部位的康复治疗，例如手臂、腿部等。同时，其配备的表面信号采集系统和电刺激技术可以针对不同的肌肉组进行个性化的训练和治疗。此外，该机器手的控制单元可以通过软件升级进行功能和性能的升级，以满足不断发展的康复治疗需求。在未来，该机器手还可以与其他医疗设备或云平台进行无缝集成，为康复治疗提供更加全面和高效的支持。

4、维修更换配件便捷

该机器手的设计考虑到了维修更换配件的便捷性。例如，各个部件之间采

用标准化的接口，方便拆卸和更换。机器手的各个部件也都标有标签，便于维修人员快速识别和定位故障。此外，机器手还配备了自诊断功能，可以通过检测系统输出的错误代码和信息，帮助维修人员快速诊断问题。采用了先进的 3D 打印技术。该机器手的各个部件均可通过 3D 打印技术快速制造和更换，使得机器手的维修和升级更加方便快捷，这些设计可以有效降低机器手的维修成本和时间，并且让配件更换变得更加便捷。

4.1.2 创新点

1. 多关节协同康复外骨骼

本作品采用手部与肘关节结合的多关节协同康复外骨骼结构，以更好地模拟人体运动并提高康复效果。相比传统的单关节运动外骨骼设备，多关节协同康复外骨骼能更全面地模拟人体动作，考虑到多个关节之间的协同运动。这样可以增加患者的康复乐观性和舒适度，同时提高康复效果。此外，多关节协同运动更接近于日常生活中的复杂动作，因此这个创新点有助于康复患者更好地恢复日常生活中更高级别的活动能力。

2. 多种生理信号采集

本作品集成了多种生理信号采集技术，以实现更加全面的患者监测和康复效果评估。其中，表面肌电信号（sEMG）用于实时监测和记录患者的肌肉活动，以评估和监控肌肉力量和疲劳程度。同时，血氧饱和度的采集可用于监测患者的心肺功能，以及血氧水平的变化情况。这些信息有助于及时发现并处理患者身体的不适或并发症，从而提高患者的康复效果和安全性。

3. 功能性电刺激（FES）

本作品将 FES 技术集成到外骨骼康复设备中，利用电刺激激活患者的肌肉，从而实现更加个性化和高效的康复过程。在使用设备时，设备会监测受伤者的生物信号，例如肌电信号和血氧水平，以便确定 FES 电刺激的频率和强度。康复计划将根据受伤者的特定情况进行定制，包括康复的目标、训练强度和频率等，以确保康复训练的最佳效果，并加速患者的康复速度。同时，利用 FES 技术进行个性化康复计划还可以帮助患者避免过度训练和再受伤的风险。

总的来说，本作品结合了多种先进技术和康复理念，设计了一款智能化、个性化和人性化的外骨骼康复设备，可以帮助康复患者更好地进行康复训练，加快康复速度，提高康复效果。同时，本作品的设计和应用也为康复领域的科技创新提供了新的思路 and 方向。

4.2 项目的应用前景和社会价值

4.2.1 研究意义

首先，它有助于探究运动控制和康复机理，通过记录和分析肌肉、神经、关节等生理信号，能够深入研究人体运动学和生理学，探究身体在不同状态下的变化和适应能力。其次，外骨骼康复设备为康复提供了一种新的手段，可以对康复对象进行个性化治疗和训练，有效提高康复效果，改善康复过程中的疲劳和不适感。此外，外骨骼康复设备还有助于缓解医疗资源短缺的问题，可以为康复中心和医院提供有效的康复方案，减轻康复机构的负担。最后，外骨骼康复设备的研究和应用还可以促进医疗器械和人工智能等领域的交叉发展，推动科技创新和应用，为人类健康事业做出贡献。

4.2.2 实际应用

外骨骼康复设备的应用在康复领域具有广泛的应用前景。通过对康复对象进行肢体功能的评估和监测，能够制定个性化的训练计划，提高康复效果。同时，外骨骼康复设备还可以在康复中心和医院中用于辅助医护人员进行患者的日常护理，减轻护理负担，提高康复患者的生活质量。此外，外骨骼康复设备还可以应用于残疾人辅助器具的研发和生产，为残疾人提供更加便捷的生活和工作方式。

4.2.3 发展趋势

外骨骼康复设备的研究和应用已经成为人工智能、机器人和康复医学等领域的重要研究方向之一^[2]。未来，外骨骼康复设备将会更加智能化、个性化、人性化，具有更高的适应性和更好的康复效果。同时，随着技术的不断发展，外骨骼康复设备的生产成本将会进一步降低，推动其在康复医疗领域的广泛应用。

4.2.4 多领域合作

本作品作为一种新型康复辅助设备，可以在医疗、军事、工业等多个领域广泛应用。在医疗领域，可以用于协助康复患者进行训练，恢复肌肉功能；在军事领域，可以提升士兵的身体素质和战斗力；在工业领域，可以减轻工人的劳动强度，提高工作效率。此外，本作品还有助于实现人机协同作业，推进智能制造、智能农业等领域的发展。

4.3 项目存在的问题

1. 算法设计难度高

生物模型构建需要基于数据分析和机器学习等技术，设计出适合特定患者

的算法模型。这需要对不同的算法模型进行比较和优化，并根据具体需求进行定制化设计，以提高模型的准确性和实用性。

2. 机械构造存在难点

外骨骼康复设备需要具备多种关节自由度，以满足不同的运动需求。这需要在设计中考虑到各种关节的旋转范围和灵活性，以实现人体自然运动的模拟。同时，在保证零件质量合理的范围内获得尽可能大的抗压能力，还需在关节自由度和作品轻便性之间进行权衡。

3. 项目成本高

生物模型构建需要大量的数据采集和处理，并且需要采用专业的设备和技术，需要投入大量的资金。同时，机械构造的设计和制造也需要充足的资金支持，包括设备、人力和物资等方面的投入。

4. 临床应用存在挑战

外骨骼康复设备的临床应用面临一些挑战，例如需要与康复机构的医护人员密切合作，需要针对不同的康复对象进行个性化治疗和训练，并且需要不断地优化和改进设备，以满足不断变化的临床需求。

4.4 改进方向

为了进一步提高外骨骼康复设备的性能和实用性，我们将采取以下措施：

- （1）提高机械臂的自由度，优化外骨骼的关节设计和材料选择，以提高设备的稳定性和负载能力，满足不同患者的个性化康复需求。
- （2）进一步优化肌电信号的采集和处理算法，加强数据分析能力，探索多模态传感器融合技术，实现更加精准的运动控制和康复训练。
- （3）探索人工智能技术在康复外骨骼领域的应用，如运动规划、姿态控制、动态模型建立等方面，以实现更加智能化的康复辅助设备。
- （4）加强与康复医院和康复中心等机构的合作，收集康复对象的真实需求和反馈，持续改进设备的设计和功能，提高设备的临床应用价值。

通过以上措施的不断推进，我们希望能够实现外骨骼康复设备的普及和推广，为更多需要康复的人提供更加优质和高效的康复服务

参考文献

- [1]程龙,夏修泽. 上肢康复外骨骼智能控制综述[J]. 机器人,2022,44(06):750-768.DOI:10.13973/j.cnki.robot.210450.
- [2]曹红升. 穿戴式上肢外骨骼设计与研究[D].上海交通大学,2017.
- [3]宋遁志,王晓光,王鑫,汪阳.多关节外骨骼助力机器人发展现状及关键技术分析[J].兵工学报,2016,37(01):172-185.
- [4] Wu Q C, Wang X S, Chen B, et al. Development of an RBFN-based neural-fuzzy adaptive control strategy for an upper limb rehabilitation exoskeleton[J]. Mechatronics, 2018,53: 85-94.
- [5]Ito S, Kawasaki H, Ishigure Y, et al. A Design of Fine Motion Assist Equipment for Disabled Hand in Robotic Rehabilitation System [J]. Journal of the Franklin Institute, 2009, 348(1) 79-89.
- [6]Satoshi Ueki, Haruhisa Kawasaki, Satoshi Ito. Development of a Hand-Assist Robot With Multi-Degrees-of-Freedom for Rehabilitation Therapy [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1): 136-146.
- [7]Panagiotis Polygerinos, Kevin C. Galloway, Emily Savage, Maxwell Herman, Connor J. Walsh. Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, 2015: 2913-2919.