

# 希望之手——手部外骨骼系统开发与设计

一、摘要	2
二、项目背景	2
2.1 研究背景与意义	2
2.2 肌电信号国内外发展现状	3
2.2.1 国内研究现状	3
2.2.2 国外研究现状	3
三、市场需求分析	4
3.1 手部外骨骼市场	4
3.1.1 市场场景需求差异化	4
3.1.2 目标用户群体市场潜力巨大	5
3.2 康复训练商用市场	5
3.3 康复训练家用化市场	6
3.4 总结	7
四、预期成果	7
4.1 项目预期	7
4.2 样机测试流程	8
4.3 志愿者招募	8
4.4 长期跟踪	8
4.5 找投资	8
五、技术选型	9
5.1 硬件部分	9
5.2 软件部分	13
5.2.1 软件整体呈模块化架构	13
5.2.2 编写方式	13
六、方案设计	14
6.1 实现手部外骨骼操作与控制	17
6.2 实现基于肌电信号的人机交互安全性操作	17
6.3 临床价值提升	17
七、技术难点及解决	18
八、总结评价	19
8.1 成本分析	19
8.1.1 研发阶段成本以及规模化生产后成本	20
8.1.2 产出收益分析	20
8.2 投入产出比 (ROI) 评估	20
8.3 改进计划	21
8.4 特色亮点	21
九、实施计划	22
十、团队介绍	23
参考文献	24

## 一、摘要

当前社会人口老龄化问题日益加重，基于 CHARLS 数据老年人口患有脑卒中疾病的风险明显上升<sup>[1]</sup>，该病症会导致患者部分肢体出现瘫痪问题。在经过前中期疗程排除脑梗后，后期则需要配合康复训练。本课题旨在研究一款能够通过肌电信号识别运动意图的手部外骨骼康复训练系统，可针对手部瘫痪患者进行重复而特定的康复动作，使瘫痪部位形成记忆从而达到恢复神经活性的目的。

## 二、项目背景

### 2.1 研究背景与意义

“脑卒中”又称“中风”，是一种由脑部血管突然破裂或阻塞导致血液供应中断，进而引发脑组织损伤的急性脑血管疾病。目前，老年人是脑卒中相关疾病的高发人群。而快速人口老龄化已经成为中国人口结构变化的重要特点。根据国家统计局的数据，2024 年末，全国 60 岁及以上老年人口达 3.1 亿人，占总人口的 22.0%，较 2023 年增加 1334 万人，老龄化水平进一步加深。中风作为人口老龄化的高发疾病，未来中风患者的数据将会持续上升。

据调查，发病之后的 1~3 个月内是对患者进行治疗与康复训练的最佳时机，超过时限后患者的康复效率和效果则会大打折扣。大部分中风患者在恢复过程中都会出现不同程度的肢体功能障碍，如上肢、下肢等，其中手部精细动作恢复因其神经支路复杂度高、运动控制皮层重组难度大，成为临床康复的瓶颈性难题。如果不及时进行合理有效地治疗，甚至会留下痉挛模式固化机关节挛缩等不可逆性的后遗症。当前临幊上主流方式仍以人工辅助为主，然而由于康复治疗师的短缺，人工康复难以满足持续的高强度重复训练，传统手法标准化不一等问题，使得大部分中风患者得不到及时有效的康复治疗，再加上康复过程中枯燥而乏味的训练使得有些康复患者对康复训练的积极性逐渐减小，导致康复治疗的效果不理想。随着机器人技术的迭代升级，智能康复设备已深度融入现代临幊实践，其中手部康复机器人作为神经功能重建的重要载体，为中风患者运动功能恢复提供了创新解决方案。

当前传统康复训练模式存在显著局限性：基于人力密集型服务模式，其不仅高度依赖专业康复治疗师的个体化指导，更受限于治疗师的工作负荷阈值，导致患者难以实现《中国脑卒中康复治疗指南》推荐的高频次、高强度标准化训练方案。为突破这一临床瓶颈，研发具有自主训练功能的手部外骨骼康复系统具有迫切现实价值——通过融合肌电信号控制技术构建人机交互闭环，该系统既可保障患者获得符合运动学习理论的重复性任务训练，又能有效优化医疗资源配置，最终实现康复治疗效率与效果的双重提升。

## 2.2 肌电信号国内外发展现状

### 2.2.1 国内研究现状

国内肌电信号研究近年来呈现多领域交叉融合态势，重点集中于康复医学、运动科学及人机交互领域。南方科技大学张明明团队开发了基于表面肌电（sEMG）的多维特征学习模型，实现了连续步态预测，准确率达 95.58%<sup>[2]</sup>；同济大学李至霖团队提出动态图网络模型，结合知识迁移技术，显著提升了序列肌电信号的识别精度<sup>[3]</sup>。此外，深圳润谊泰益科技通过高密度无线采集系统与织物电极技术，推动了国产肌电设备的低成本化与可穿戴化<sup>[4]</sup>。在硬件领域，256 通道无线采集系统与柔性织物电极的应用，使信号采集信噪比提升至临床诊断标准。早期国内研究以线性时域/频域分析为主，依赖进口设备。硬件层面，从依赖针电极转向高密度表面电极，并突破运动伪影抑制技术，使动态环境下的信号稳定性大幅提升<sup>[5]</sup>。

### 2.2.2 国外研究现状

国际肌电研究聚焦神经解码与微创技术革新。加拿大西蒙弗雷泽大学的 James M. Wakeling 通过 sEMG 信号分析，揭示了运动单位募集策略的时空特性<sup>[6]</sup>；南加州大学 Hangbo Zhao 团队开发柔性微针电极阵列，实现了肌肉内动态 EMG 的高保真采集，拉伸耐受性达 90%<sup>[7]</sup>。

前沿研究已进入神经-机器接口的闭环控制阶段。例如丹麦奥尔堡大学等机构研究人员通过 CMAP 扫描技术，量化了脑卒中后运动单位丢失与再支配机制<sup>[8]</sup>。在基础理论层面，肌电复杂度分析与确定性线段百分比等非线性指标，成为评估神经肌肉病理的新标准。传统

研究依赖侵入式针电极与静态实验室环境。近三十年，高密度表面电极与无线采集技术的普及，使研究场景扩展至日常生活。算法层面，从基于 FFT 的频谱分析发展为时空-频多维特征融合模型，如 STFEN 网络在序列动作识别中的误差率降至 3.4%。此外，微创柔性电极的突破，将临床诊断成本降低至传统方法的 50%。针对以上脑卒中患者术后手部康复需求以及分析对比人工康复训练和手外骨骼机器人的优缺点，本课题旨在设计并开发一种基于欠驱动的手部外骨骼康复系统。欠驱动手外骨骼技术作为一种新兴的康复辅助手段，其研究有助于推动康复医疗技术的发展，为患者提供更多样化的治疗方案；并且得益于欠驱动系统的简单结构、成本较低、易于操作等优势，能够为患者提供长期的、个性化的康复训练，不仅能够有助于提高康复效果而且开发经济高效的康复设备可以减轻患者及家庭的经济负担，使得康复服务更加普及和可持续。针对手外骨骼康复机器人的研究可以促进生物力学、机器人学、人机交互等多个学科的交叉融合，推动相关科学技术的进步。

### 三、市场需求分析

外骨骼市场正迎来快速发展期，其核心驱动力来自社会需求与技术创新的双重作用。全球每年新增超 1500 万脑卒中与脊髓损伤患者，叠加老龄化社会对手部精细动作康复的刚性需求，传统康复手段已难以满足患者生活自理与功能重建的期待。近年来，柔性驱动、神经感知等技术的突破，使外骨骼能精准模拟手指 0.1 毫米级运动，而设备成本下降（部分家用型号低于 8 万元）与模块化设计，更推动其从医疗机构向家庭场景延伸，形成“精准评估-阶梯训练-生活融入”的全链条康复体系。下文将围绕手部外骨骼市场、康复训练商用市场、康复训练家用化市场三大角度展开具体市场分析。

#### 3.1 手部外骨骼市场

##### 3.1.1 市场场景需求差异化

在医疗康复领域，全球手部功能障碍患者超 1.2 亿（WHO, 2024），脑卒中患者手功能恢复率不足 30%，催生了对智能化、标准化

康复设备的迫切需求。手部外骨骼通过多自由度仿生训练系统及模块化设计，可精准适配从轻度肌力减退到重度运动功能障碍患者的差异化需求，为神经功能重塑提供量化支持。在职业辅助领域，精密制造（电子装配）与高危作业（电力维修）场景对手部外骨骼提出更高技术要求，数据显示，职业性肌肉骨骼疾病占职业病总数的 40%，而智能外骨骼通过力学代偿与动作优化技术，可将重复性劳损风险降低 50% 以上，成为职业健康防护的创新解决方案。

### 3.1.2 目标用户群体市场潜力巨大

神经系统疾病患者如脑卒中、脊髓损伤等，常因疾病导致手部功能障碍，可借助手部外骨骼开展康复训练，以此促进神经功能重塑及手部运动功能恢复；手部外伤患者，例如手部骨折、肌腱损伤的人群，同样能通过手部外骨骼进行辅助康复训练，进而加速康复进程；而对于老年人而言，随着年龄增长，手部肌肉力量和灵活性逐渐下降，手部外骨骼可辅助他们完成日常生活动作，提升生活质量。

## 3.2 康复训练商用市场

从经济学视角来看，康复外骨骼设备的产业化进程展现出典型的多维驱动态势。随着我国人口结构老龄化的加剧，康复医疗的刚性需求不断释放。截至 2024 年末，我国 60 岁及以上老年人口已达 3.1 亿人，且慢性病患者数量庞大，以脑卒中为例，每年新增患者约 200 万人，这些慢性病患者有着长期的康复治疗需求。与此同时，传统康复体系面临着诸多困境。根据相关调研，传统康复服务成本平均每次约为 500 元，并且专业康复人员缺口巨大，据中国康复医学会统计，康复专业人员缺口高达 70%。这种供需失衡在医疗资源空间分布不均的情况下愈发显著，优质医疗资源主要集中于城市三级医院。而智能外骨骼系统凭借其高效的康复作用，正在重塑康复医疗资源的配置模式。

值得一提的是，国产化进程极大地推动了康复外骨骼设备核心部件成本的降低。以某国产康复外骨骼设备企业为例，通过自主研发与技术创新，在近三年内，其核心部件成本下降了约 65%。加之医保政策的积极推动，部分地区医保支付体系对康复外骨骼设备相关治疗费

用的覆盖比例达到了 60%，这直接促使终端需求实现了约两倍的增长。资本市场也对康复外骨骼设备行业表现出强烈的兴趣，近三年来，资本市场对该行业的投入超过 50 亿元，构建起了从技术研发、临床验证到服务落地的完整商业闭环，有力地推动行业朝着千亿规模的智慧医疗生态迈进，形成了技术突破、市场扩容与制度创新协同发展的良好格局。

### 3.3 康复训练家用化市场

随着近些年全球老龄化人口比例增加，传统康复模式难以承受康复训练家用化需求增长。同时，现代生活方式的改变，使得慢性疾病的发病率呈上升趋势。例如，久坐不动的工作模式、不健康的饮食习惯以及环境污染等因素，导致肥胖症、颈椎病、腰椎间盘突出症等慢性疾病在中青年群体中也较为常见。这些慢性疾病往往需要长期的康复治疗与训练，以缓解症状、提高生活质量。患者为了更便捷地进行康复训练，减少往返医院的麻烦，对家用康复训练设备和服务的需求愈发强烈。

近几年康复训练家用化市场规模呈现出快速增长的态势，2021 年全球康复设备市场规模达到了 126 亿美元，预计到 2027 年，市场规模将达到 183.3 亿美元。2021-2027 年期间，全球康复设备市场将以 6.45% 的复合年增长率增长<sup>[9]</sup>。康复训练家用化市场竞争激烈，参与者众多，包括传统医疗器械企业、新兴科技公司以及跨界进入的互联网企业等。但小型化康复机器人是近年来市场上的新兴产品，具有广阔的发展前景。这些机器人能够模拟专业康复机构中的大型康复设备的功能，为用户提供精准、个性化的康复训练。部分小型化康复机器人融入游戏互动功能，把枯燥康复训练和游戏结合，大幅提升患者依从性，有助于患者更积极投入康复训练，提高康复效果，如虚拟投篮康复训练游戏，让患者在玩乐中锻炼肢体功能。

同时国家也出台政策支持康复辅助器具产业的发展。例如，我国国务院办公厅印发了《关于发展银发经济增进老年人福祉的意见》，明确重点培育包括康复辅助器具产业在内的七大极具潜力的产业。各地政府也积极推动康复辅助器具产业园的建设，出台税收优惠、金融

扶持等政策，为企业发展创造良好的政策环境，有助于促进康复训练家用化市场的繁荣。

### 3.4 总结

外骨骼市场呈现“医疗刚性需求主导、工业与消费场景延伸”的多元格局。本项目聚焦手部外骨骼领域，通过以下“三个保持”策略抢占市场：保持自身独立性与先进性，维持技术差异化。开发模块化设计，兼容康复与职业辅助场景，突破柔性驱动与生物信号解码技术；保持原有商业模式，合理进行创新。针对医疗机构推出“按疗效付费”方案，针对家庭用户提供“硬件+订阅制服务模式”；保持生态协同与产品革新。联合三甲医院构建临床数据库，优化 AI 训练算法，加速产品迭代。

## 四、预期成果

### 4.1 项目预期

本系统将构建基于 STM32F103R8T6 主控芯片的多模态感知驱动手部外骨骼，集成 EMG 肌电信号、曲度传感器与压力传感器的实时数据融合，通过推杆电机实现精准关节控制（角度跟踪误差 $\leq 3^\circ$ ），整机重量 $\leq 300\text{g}$  并通过 OpenSim 生物力学模型优化控制策略，降低误触发率至 5% 以下，适配个性化手部尺寸。系统具备主动/被动双训练模式，可缩短脑卒中患者手功能恢复周期 30%，结合游戏化交互界面使训练依从性提升至 85%，AI 算法自动生成康复报告准确率 $\geq 90\%$ 。与此同时模块化设计预留传感器扩展接口，满足未来气动驱动升级需求，多重安全保护机制（20ms 急停响应+压力过载切断）确保使用安全性。设备支持 BLE5.0 远程医疗数据管理，既为商业化落地提供“精准康复+智能交互”双核竞争力，也为智能康复设备产业化提供更高性价比解决方案。

本项目也将助力团队冲击“挑战杯”国奖及“互联网+”国赛奖项，在中国高校智能机器人创意大赛中，以“肌电-力学协同控制算法”与“轻量化外骨骼结构设计”为核心竞争力，争夺最佳技术奖与最佳应用奖。计划以“肌电-曲度传感融合控制”为创新点，申报 1 项实用

新型专利（如“手部外骨骼多模态安全控制系统”）和 1 项软件著作权（康复训练数据管理平台），夯实技术保护；撰写 1 篇中文核心期刊论文（如《中国康复医学杂志》），聚焦手功能康复的临床数据验证；同步投稿 EI 会议论文（如 IEEE 生物医学工程国际会议），展示低成本外骨骼设计思路。

#### 4.2 样机测试流程

对报名的志愿者进行初步筛选，确保其符合测试条件（如脑卒中后手部功能障碍、无其他严重疾病等）。在测试开始前，对志愿者的手部功能进行评估，记录其手部关节的活动范围、力量、灵活性等指标。

为志愿者佩戴手部外骨骼系统，并根据其手部尺寸进行调试，确保系统的适配性和舒适性。志愿者通过手部外骨骼系统进行手指的弯曲和伸展训练，每次训练持续 10-15 分钟，每天进行 1-2 次训练。在训练过程中，系统会实时记录手指关节的角度、受力情况等数据，并通过手机 APP 显示。通过压力传感器监测手指受力情况，当检测到受力过大时，系统会自动中断训练并复位。在测试结束后，再次对志愿者的手部功能进行评估，记录其手部功能的改善情况。

#### 4.3 志愿者招募

目标人群为脑卒中后手部运动功能障碍的患者，尤其是手部僵柔韧性较差的患者。与当地医院的康复科合作，招募正在接受康复治疗的脑卒中患者。通过社区健康讲座、康复中心宣传等方式，招募有康复需求的志愿者。通过社交媒体、康复论坛等线上平台发布招募信息，吸引有需求的志愿者参与。

#### 4.4 长期跟踪

对部分志愿者进行长期跟踪，评估其在长期使用手部外骨骼系统后的康复效果。通过长期测试积累更多的临床数据，为系统的进一步优化和推广提供科学依据。

#### 4.5 找投资

为了将手部外骨骼系统推向市场，寻找投资是至关重要的一步。以下是寻找投资的具体方案：

通过校内资源支持 竞赛奖金与科研资助，可通过参加校内科技竞赛（如"挑战杯"、创新创业大赛）或申请校级科研项目资助获得启动资金。也可申报政府专项计划、地方性科研培育基金、中央高校专项资金，与企业合作，与市场化融资，通过高校发布技术需求，学生团队"揭榜"后可获资金与导师支持。通过竞赛成果转化激励项目，如中国国际大学生创新大赛重点项目。最后也可通过 学术成果变现。如论文发表获得经费支持、专利授权后可通过学校技术转移中心对接企业。

## 五、技术选型

### 5.1 硬件部分

图 5.1 展示了基于欠驱动的手外骨骼机器人运动学模型，其中坐标系原点位于 O 点，即 MCP（掌指关节）关节的位置。人体手指的 MCP、PIP（近端指间关节）和 DIP（远端指间关节）分别定义为点 R、P 和 M（如图 5.2），旋转指定为  $\theta_{MCP}$ 、 $\theta_{PIP}$ 、 $\theta_{DIP}$ 。推杆电机的基点为 S，在 OA 接地，L\_TB 为推杆的最大行程。O'R、RP、PM 和 ML 分别代表掌骨、近端指骨、中指骨和远端指骨。外骨骼的运动学模型由三条闭环链组成。MCP 闭环链由 A、B、C、D、R 五点组成；PIP 闭环链包括一个虚拟六杆连杆机构，由点 D、E、F、G、H 和 P 组成；DIP 闭环链由点 H、点 I、点 J、点 K、点 M 组成虚拟五杆机构。各闭环方程如下：

$$L_{AB}e^{i\theta_A} + L_{BC}e^{i\theta_B} + L_{CD}e^{i\theta_C} = L_{AR}e^{i\theta_{AR}} + L_{RD}e^{i\theta_{RD}}$$

$$L_{DE}e^{i\theta_D} + L_{EF}e^{i\theta_E} + L_{FG}e^{i\theta_F} + L_{GH}e^{i\theta_G} = L_{AR}e^{i\theta_{AR}} + L_{RD}e^{i\theta_{RD}}$$

$$L_{HI}e^{i\theta_H} + L_{IJ}e^{i\theta_I} + L_{JK}e^{i\theta_J} = L_{HM}e^{i\theta_{HM}} + L_{MK}e^{i\theta_{MK}}$$

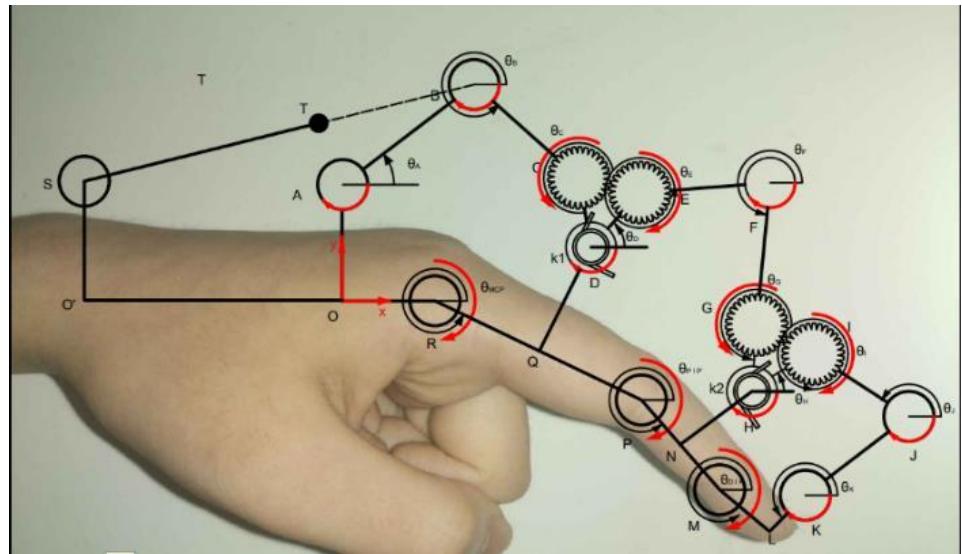


图 5.1 手外骨骼机器人运动学模型



图 5.2 手部关节示意图

在手部外骨骼的设计与制作过程中，首先利用 SolidWorks 进行 3D 建模，如下图 5.3 所示，通过模拟人手的自然运动来确保机械结构的合理性与功能性；之后借助 3D 打印技术制作各个零件，以实现轻量化和适配性。其驱动源采用 5 个推杆电机（4 个 50mm 行程，1 个 25mm 行程），通过齿轮连杆传动实现手指的弯曲和伸展运动。

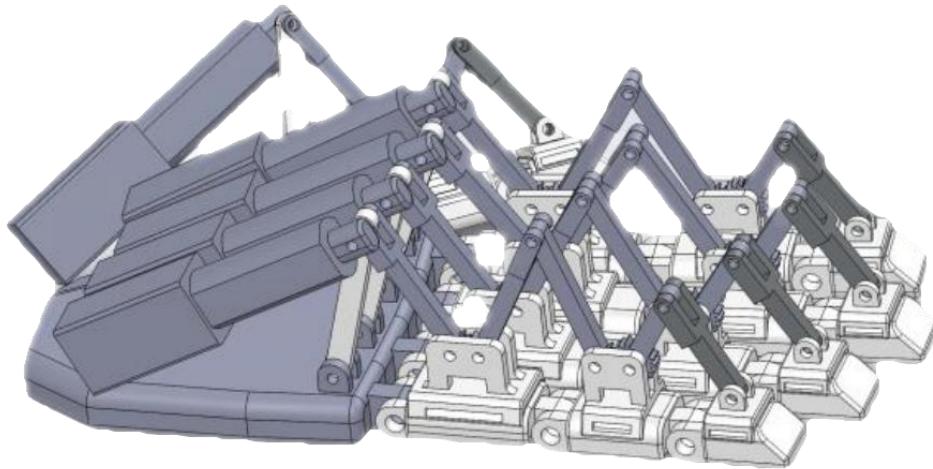


图 5.3 SolidWorks3D 建模

在传感器及控制、电源、通信等模块方面，主控制板选用 STM32F103R8T6 微控制器作为主控芯片（如图 5.4），因其具有 51 个 I/O 口，能满足系统中较多驱动单元和传感器单元的需求，其中 11 个 I/O 用于采集曲度传感器检测的模拟电压值，10 个 I/O 用于驱动控制电机正反转，10 个 I/O 用于压力传感器检测的数字电压，该主控芯片负责处理传感器信号、控制电机驱动以及通过蓝牙与手机 APP 通信；电源模块使用 18.5V 直流电源，并通过 LM2596 降压稳压芯片为系统提供稳定的 12V 电压；蓝牙模块采用 DA14531 BLE5.0 低功耗蓝牙模块，实现与手机 APP 的无线通信。

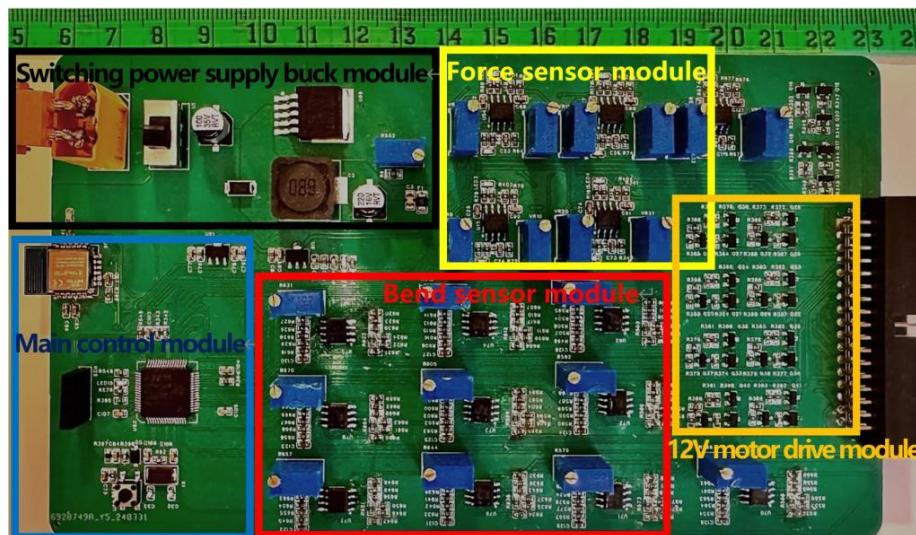


图 5.4 主控制电路板

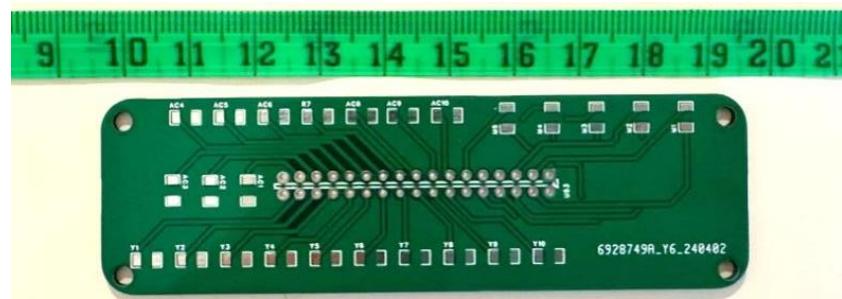


图 5.5 拓展电路板

此外，推杆电机无需任何中间转换机构，可提供更直接和精确的线性运动（如图 5.6）。传感器采用垫片式传感器、曲度传感器（如图 5.7）。其中垫片式压力传感器型号为 FSR400，为达到适用于检测手指节所受外骨骼作用力，故选用传感器直径为 7mm、感应区直径为 5mm 的小型压力传感器。其灵敏范围为 0.2N~20N，符合所需检测压力临界值范围。曲度传感器型号为 BF350-20AA/30AA，为满足测量 PIP 与 MCP 关节的弯曲 角度大小，选用的传感器尺寸分别为 20\*3mm、30\*3mm，分别对应小关节 PIP 以及大关节 MCP。传感器工作电压为 DC 0~5V，输入电流最大为 1A，电阻大小为  $350\pm 3\Omega$ ，基底材料为酚醛-环氧。

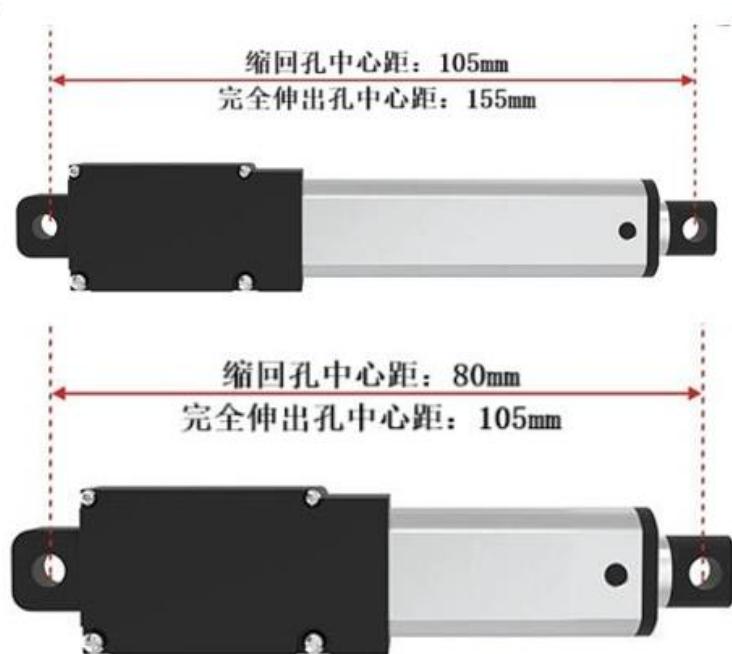


图 5.6 四指及拇指推杆电机



图 5.7 传感器位置示意图

## 5.2 软件部分：

### 5.2.1 软件整体呈模块化架构

手机 APP 作为人机交互模块，负责接收用户指令和显示系统状态信息。系统控制程序则涵盖传感器数据处理、电机驱动控制和通信管理等功能模块。传感器数据处理模块负责采集和分析压力传感器与曲度传感器的数据，判断是否触发安全机制或为用户提供关节角度信息；电机驱动控制模块依据接收到的指令和传感器数据，控制推杆电机的运动；通信管理模块则通过蓝牙实现手机 APP 与主控制电路板之间的数据传输。

### 5.2.2 编写方式

手机 APP 使用 QT Creator 进行编写，利用其模块化图形化设计功能，构建出包含启停开关按钮、运行状态显示区、传感器数据显示区等元素的上位机界面。界面布局简洁直观，方便用户操作。在系统控制程序方面，采用 C 语言编写。针对传感器数据处理，通过读取压力传感器和曲度传感器的信号，转化为相应的物理量进行判断和处理。电机驱动控制部分，通过设置 I/O 口的推杆输出，控制推杆电机的正反转，实现手指的弯曲和伸展动作，并且为避免电机同时启动造成外骨骼接触冲突，对拇指推杆电机的启动和收缩进行了延时处理。通信管理部分，借助 BLE 低功耗蓝牙模块 DA14531 BLE5.0，

编写串口通信程序，实现手机 APP 与主控制电路板之间稳定的数据传输，确保指令的准确发送和传感器数据的实时反馈。

## 六、方案设计

该系统是针对脑卒中患者的术后手部后期康复疗程，基于刚性机械外骨骼以及推杆电机代替人工辅助训练以提高康复训练的效率，同时利用压力传感器，肌电信号传感器接收信息传输给中控系统进行相关数据处理并通过程序对训练进程进行干预以及监控手部实时运动信息。其中刚性手外骨骼的欠驱动模式能够实现对每个手指进行独立的康复训练并且得利于驱动元件较少的特点，其拥有较好的便携性。此外，手外骨骼的机械结构将采用 3D 打印技术进行制作，能有效控制系统的重量和试错成本；其中传感器由压力传感器，表面肌肉电信号传感器构成，分别为系统提供手外骨骼对指节作用力信息以及手指 MCP 和 PIP 关节角度信息。

为实现外骨骼机器人替代人工手部康复训练，将系统结构设计为如图 6.1 所示，系统的主要结构包括主控单元、执行机构、信息感知模块、人机交互、直流电源。执行机构是康复系统的核心部分，包括外骨骼机械结构以及驱动推杆电机，负责执行手部运动，能够带动手指进行弯曲和伸展等动作；主控单元采用 STM32F103R8T6 微控制器，负责处理来自传感器的信号并且控制电机的驱动动作，以协调手部运动；信息感知模块用于实时监测和采集手指关节的运动信息，采用表面肌肉电信号传感器以确保训练的安全性和有效性；人机交互通过手机 APP 上位机实现用户可以使用 APP 通过蓝牙通信发送指令，控制康复训练的开始、停止等操作，并监控训练状态；18.5V 直流电源为整个系统提供稳定的电力供应，确保系统正常运行。整个手部外骨骼康复系统的设计旨在通过精确控制和实时监测，辅助脑卒中后手部运动功能障碍的患者进行有效的康复训练。系统的模块化设计不仅能够提高便携性以及安全性，还便于整体系的维护和升级。

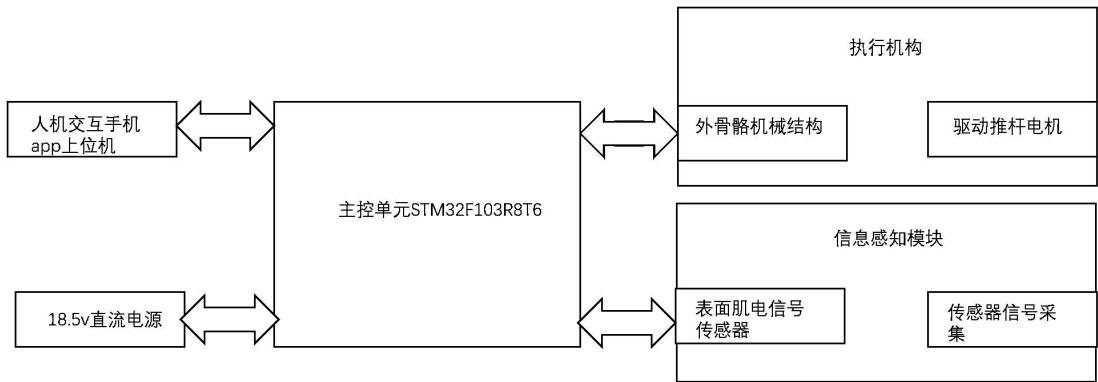


图 6.1 系统结构图

该系统工作的主要流程为：系统用户可以通过蓝牙通信在手机 APP 上位机内向主控单元发送运行指令，主控单元控制推杆电机驱动外骨骼执行机构，执行机构将带动佩戴者手指进行弯曲、伸展运动，整个康复过程是不断重复直至用户通过上位机结束训练或者训练中途触发安全性中断程序。系统运行过程中曲度传感器负责将手指各关节的角度信息传输给上位机，供使用者获取手部训练信息。另外，从系统整体运行的安全性考量，在传动齿轮处设置弹簧增加被动力反馈以提高手部外骨骼的自适应性。系统技术路线图如图 6.2 所示，本文的系统研究主要包括手外骨骼的运动机理研究、系统控制算法的研究、人机交互方式研究。

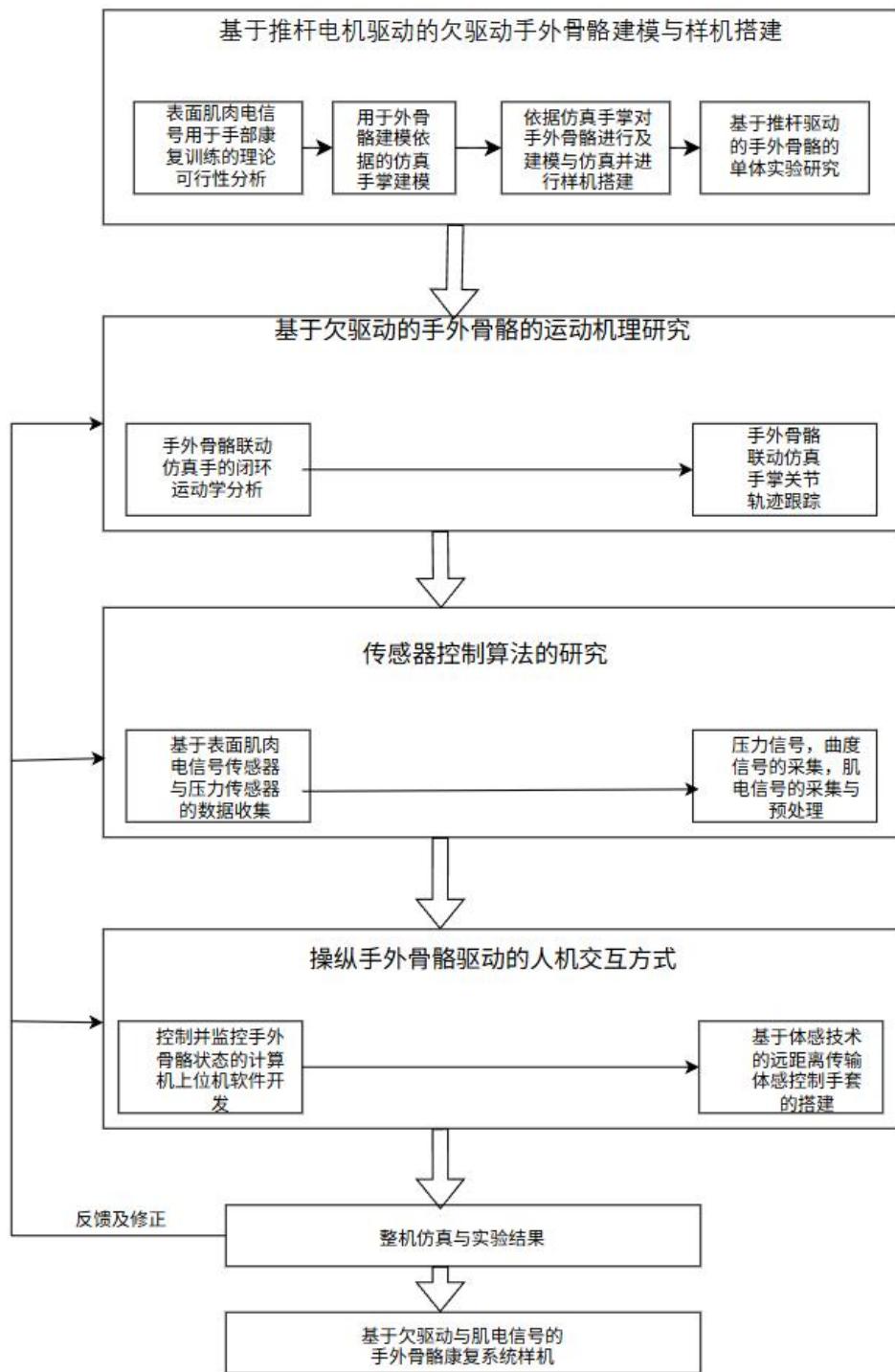


图 6.2 系统技术路线图

## 6.1 实现手部外骨骼操作与控制

系统以 STM32F103R8T6 为主控芯片（72MHz 主频， 64KB Flash），通过 FreeRTOS 实时操作系统实现多任务调度，确保传感器数据处理、电机控制与蓝牙通信的并行运行。控制架构采用分层策略：决策层基于 SVM 算法解析肌电信号（RMS 值  $> 50\mu\text{V}$  触发助力），并联合曲度传感器监测的关节角度（如  $\text{MCP} > 70^\circ$ ）进行双重校验；规划层利用五次多项式插值生成平滑关节轨迹，保障动作连贯性；执行层通过 PID 算法（ $K_p=2.5$ ,  $K_i=0.01$ ,  $K_d=0.1$ ）调节推杆电机的 20k Hz PWM 输出，实现精准控制。

硬件配置上，推杆电机采用 50mm 行程（四指）与 25mm 行程（拇指），推力 20N，响应延迟  $\leq 100\text{ms}$ ；曲度传感器（BF350-20AA/30AA）实时监测 MCP/PIP 关节角度（精度  $\pm 1.5^\circ$ ），压力传感器（FSR402）检测接触压力（0-10kg 量程，灵敏度 10g），超阈值 ( $> 2\text{kg/cm}^2$ ) 时触发急停复位。

手机 APP 基于 QT Creator 开发，通过 DA14531 BLE5.0 模块实现蓝牙通信，实时显示关节角度曲线、压力热力图及训练日志，支持主动/被动模式切换。系统通过多模态数据融合与三级安全机制，确保康复训练的高效性与安全性。

## 6.2 实现基于肌电信号的人机交互安全性操作

肌电传感器选型为 MyoWare 肌电传感器（单通道成本 300 元）+ ADS1299 生物电位采集芯片（24 位 ADC），信噪比  $\geq 60\text{dB}$ ；信号处理的前端调理使用 INA333 仪表放大器（增益 1000 倍）+ 四阶巴特沃斯滤波（0.1-500Hz）；嵌入式算法使用数字陷波（50Hz 工频滤波）+ RMS/ZC 特征提取，分类准确率  $\geq 90\%$ 。

## 6.3 临床价值提升

主动康复模式下肌电触发助力使患者参与度提升 40%，结合虚拟抓握任务提升依从性至 85%；基于 OpenSim 生物力学模型从而生成个性化方案，缩短康复周期 30%。

## 七、技术难点及解决

首先是欠驱动结构的运动精度控制。欠驱动技术通过一驱三形式，易因传动链路误差导致各关节运动角度与预期不符，影响康复训练的精准性。故采用齿轮连杆传动，通过精确的传动比设计减少动力传输损耗，确保各关节运动的协调性。利用 SolidWorks Motion 模块进行仿真分析，提前验证食指 MCP、PIP、DIP 关节的运动轨迹，采用仿真优化机械结构参数使运动更协调。最后实物测试中通过曲度传感器实时监测关节角度，结合 STM32F103R8T6 主控芯片的闭环控制逻辑，动态修正运动偏差。

然后是系统安全性与佩戴舒适度的平衡难点，刚性外骨骼与手部接触时，若驱动力度过大或适配性不足，可能导致患者手部损伤，尤其脑卒中患者对疼痛敏感度较低，风险更高。解决办法采用集成垫片式压力传感器，当检测到指节受力超过阈值时，系统立即中断并复位，避免过度压迫。同时在指节基座处添加双弹簧机构，通过被动力反馈缓冲刚性冲击，提升佩戴舒适度。本项目参考了《中国成年人手部型号》标准设计尺寸，并采用 3D 打印技术实现个性化适配，减少尺寸不匹配导致的不适。

还有多模块协同的稳定性难点，系统包含机械执行机构、传感器、电机驱动、蓝牙通信等多模块，模块间信号干扰或同步延迟可能导致运行不稳定。所有采用了双层板结构的主控电路板，将电源模块、控制中心、传感器采集、电机驱动等模块分区布局，减少电磁干扰。设计出拓展电路板整合电机驱动输出与传感器信号输入，通过 34PIN J-TAG 接口与主控板连接，简化线路并提高信号传输稳定性。软件层面通过程序逻辑控制电机启动顺序，如拇指电机延迟 1s 启动，避免多电机同时运行导致的机械冲突和电流波动。最后是康复训练的持续性与可靠性难点及解决。

系统需长期重复执行弯曲-伸展动作，电机过载、零件磨损等问题可能影响持续性，尤其针对手部僵硬患者时故障率更高。故选用负载上限 120N 的推杆电机，支持 4-15mm/s 的速度调节，满足不同康复阶段需求，并内置断电保护功能，防止过载损坏。通过 10 次重复

训练实验验证稳定性，针对模拟僵硬手部用医用胶带缠绕的测试中（如图 7.1），压力传感器能有效触发保护机制，确保极端情况下的可靠性。同时该手部外骨骼采用 3D 打印+金属紧固件的组装方式，兼顾零件强度与轻量化，降低长期使用的磨损风险。这些技术难点的解决，最终保障了系统在康复训练中的精准性、安全性和稳定性，使其能够有效辅助脑卒中患者进行手部功能恢复训练。



图 7.1 用医用胶带缠绕的各手指关节

## 八、总结评价

### 8.1 成本分析

表 8.1 成本分析

开支科目	经费预算(元)	主要用途
材料费	1000	手外骨骼实物
材料费	500	推杆电机
材料费	500	各类控制模块
材料费	200	嵌入式硬件
材料费	1500	购买软件所需 SDK
材料费	1000	机械手教具
材料费	500	各类操纵元件及附加器件
知识产权费	900	申报专利以及发表期刊

### 8.1.1 研发阶段成本以及规模化生产后成本

研发阶段成本包括直接成本和间接成本。直接成本包括设计与仿真成本，如使用 SolidWorks 进行 3D 建模、MATLAB 运动学分析的软件授权费用，以及研发人员工时成本。原型制作成本，如 3D 打印材料及设备使用费用、元器件采购费用，如推杆电机、曲度传感器、压力传感器、STM32 主控芯片、蓝牙模块等。测试与调试成本，如实验过程中的耗材，如医用胶带、魔术贴、志愿者测试补贴、设备损耗等。间接成本包括专利申请费用、论文发表费用、实验室场地及设备折旧费用。

规模化生产后成本包括材料与零部件成本，如 3D 打印批量生产的材料成本、标准化电子元件，如传感器、电机、主控模块的采购成本在规模化后可通过批量采购降低单价。组装与质检成本，如生产线人工成本、产品质检流程费用。软件与维护成本，如手机 APP 上位机的迭代优化成本、售后技术支持费用。

### 8.1.2 产出收益分析

该设备的收益从直接经济收益方面来看包括产品销售收益，如作为康复医疗设备，可向医院、康复机构或家庭出售，定价需参考同类产品，如现有手部外骨骼设备价格通常较高，而该系统因欠驱动技术和 3D 打印降低了成本，具备价格竞争力。长期服务收益，如若提供设备租赁、软件订阅等服务，可产生持续收益。

从间接社会收益方面来看包括医疗成本节约，如替代人工康复训练，减少康复治疗师的人力投入，降低医院运营成本；同时减轻患者家庭的护理负担。康复效率提升，如系统可实现高强度、持续性训练，缩短患者康复周期，间接减少长期治疗的医疗支出。市场推广价值，如作为经济高效的解决方案，适合在基层医疗或资源有限地区推广，扩大市场覆盖范围，提升社会认可度。

## 8.2 投入产出比（ROI）评估

短期由于研发阶段以投入为主，如专利、原型制作、测试，短期可能无直接经济收益，但需通过专利转化、技术转让或政府科研补贴回收部分成本。此时 ROI 可能为负，但需结合长期收益评估。当规模化应用后由于这款手外骨骼设备相比全驱动外骨骼设备，因采用欠驱动技术结构简单、又采用 3D 打印技术使得材料成本降低，边际成本更低，规模化后 ROI 提升潜力较大。

### 8.3 改进计划

在这款基于欠驱动技术的手部外骨骼康复系统基础上，在未来计划将曲度传感器和压力传感器改进为肌电传感器。这样可进一步提升系统与使用者的交互精准度和康复训练的个性化水平。肌电信号直接反映人体运动意图，通过采集前臂肌肉的肌电信号，能更快速、直观地捕捉使用者的手部运动意愿，使外骨骼的驱动更贴合自然动作节奏，避免曲度传感器依赖关节角度变化的间接性滞后。

结合系统现有 STM32F103R8T6 主控单元的多 I/O 口资源，可实现肌电信号的实时采集与处理，再通过蓝牙模块传输至手机 APP 上位机，既能保留原有的远程监控功能，又能让训练控制更具主动性——例如根据肌电信号强度动态调整推杆电机的驱动力度，适配不同康复阶段患者的肌肉力量变化。这种改进不仅延续了系统欠驱动设计的经济性和 3D 打印的适配优势，还能通过肌电信号与运动执行的联动，增强患者在康复训练中的参与感和主观能动性，为脑卒中患者的手部功能恢复提供更智能、个性化的辅助方案。

### 8.4 特色亮点

这款手外骨骼康复设备采用欠驱动技术，减少驱动元件，简化结构的同时实现各手指独立康复训练，提升便携性。同时融合了 3D 打印技术，降低制作成本与试错成本，适配成人手部尺寸标准。手外骨骼集成压力与曲度传感器，实时监测运动状态与安全阈值，保障训练安全。结合蓝牙与手机 APP，实现远程操控与数据反馈，优化人机交互体验。系统能有效辅助手指运动，稳定性和安全性良好，可为康复医疗提供经济高效的解决方案，减轻患者家庭负担，推动康复服务普及。

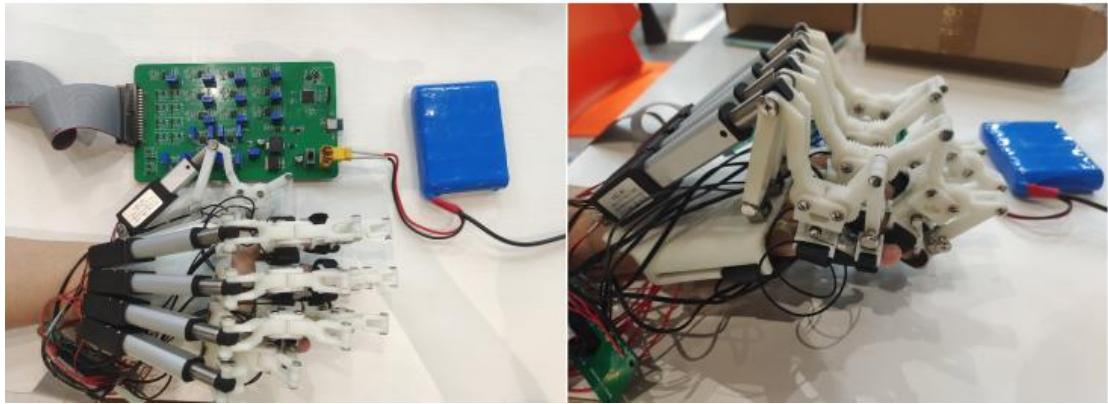


图 8.1 手外骨骼实物图

## 九、实施计划

2025 年 1 月 3 日-2025 年 1 月 16 日：资料收集、了解比赛规则要求与目标。团队成员共同梳理项目选题方向。与此同时，查阅国内外手部外骨骼相关文献、研究报告，深入剖析市场上现有产品资料，为后续设计提供理论和实践参考。

2025 年 1 月 17 日- 2025 年 1 月 31 日：需求分析与市场调研依据收集的资料，结合脑卒中患者康复需求及市场现状，进行详细需求分析。

2025 年 2 月 1 日 - 2025 年 2 月 14 日：产品规划与概念设计基于需求分析和市场调研结果，进行产品规划，明确产品功能、性能指标、适用人群和预期效果。开展概念设计，团队成员头脑风暴，从机械结构、驱动方式、控制方法等方面进行初步构思，并绘制草图。

2025 年 2 月 15 日-2025 年 2 月 28 日：详细设计与方案编制确定最终概念设计方案后，进行详细设计。机械结构设计人员使用 Solid Works 进行 3D 建模，精确设计各部件尺寸、形状和装配关系；电子电路设计人员选择合适的主控芯片、传感器、电机等硬件，设计电路原理图和 PCB 板；软件设计人员规划软件架构，确定各模块功能和交互方式。完成详细设计后，按照比赛要求编制初赛作品方案，包括项目背景、设计方案、技术选型、实施计划、成本分析等内容。

2025 年 3 月 1 日- 2025 年 3 月 14 日：方案审核与优化团队内部对初赛作品方案进行审核，从技术可行性、创新性、实用性、成本控制等方面进行全面评估。邀请相关领域专家、老师进行指导，根据反

馈意见对方案进行优化和完善，确保方案质量。

2025年3月15日-2025年3月31日：竞赛规程学习与准备密切关注大赛官网，学习发布的竞赛规程和评分标准，明确比赛重点和评审要点。根据竞赛规程要求，再次检查初赛作品方案，确保符合比赛规定。同时，准备项目相关的辅助材料。

2025年4月1日-2025年4月15日：作品提交与赛前演练在大赛平台上提交初赛作品方案，确保提交资料完整无误。

2025年4月16日-2025年4月30日：等待大赛组委会的作品初审结果。在等待期间，团队成员对作品方案进行进一步完善，开始搭建实物，优化细节，准备可能的修改意见。若收到初审反馈意见，及时进行针对性修改。

2025年5月：后续计划根据初赛结果再进行调整。

## 十、团队介绍

团队名称：仲景智联

团队成员：

彭祖桃：

研究生一年级，擅长 ros 机器人仿真和嵌入式 Linu 下 c 应用编程，在本次比赛中负责嵌入式设计和手部外骨骼的仿真以及实现系统的多人机交互模式。

获奖经历：

2022年6月—2022年8月参与中国高校智能机器人创意大赛国家级一等奖

2024年9月—2025年2月参与丘陵农机路径跟踪项目

2022年12月 获得 2021-2022 学年国家励志奖学金

2022年11月 获得四川省/重庆市大学生信息素养大赛校级三等奖

2021年12月 获得 2020-2021 学年校级二等奖学金

2022年12月 获得 2021-2022 学年校级二等奖学金

赵轩彬：

大学一年级，擅长 soildworks 建模、matlab 仿真设计，在本次比

赛中负责完成手外骨骼系统的建模与仿真和手部外骨骼康复系统的嵌入式设计以及手外骨骼系统的实物搭建。

雷雅雯：

大学一年级，擅长嵌入式设计、matlab 仿真设计，在本次比赛中负责完成手部外骨骼康复系统的嵌入式设计与仿真和手外骨骼康复系统的文献综述以及手外骨骼系统的实物搭建。

秦雨萌：

大学一年级，擅长嵌入式设计、soilworks 建模，在本次比赛中负责完成手部外骨骼康复系统的建模和嵌入式设计以及实现手外骨骼系统的单系统调试。

## 参考文献

- [1] 中国健康与养老追踪调查(China Health and Retirement Longitudinal Study, CHARLS)数据库
- [2] Zhang M, et al. Predicting Continuous Locomotion Modes via Multidimensional Feature Learning from sEMG [J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 待补充卷期页码.
- [3] 《IEEE JBHI | 封面文章：基于知识迁移与动态图网络的序列表面肌电信号识别》[EB/OL]. (2025-02-19)[2025-03-29].
- [4] 肌电信号研究聚焦应用端 润谊泰益探索国内多领域合作 [N]. 每日经济新闻, 2021-08-08.
- [5] 科研人员在皮肤集成电子领域取得新进展 - 清华大学。清华大学, 2023 年 3 月 22 日
- [6] Wakeling, J. M. Patterns of motor recruitment can be determined using surface EMG[J]. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2007.
- [7] Zhao, Q. N., Gribkova, E., Shen, Y. Y., Cui, J. L., Naughton, N., Liu, L. S.,... Zhao, H. (2024). Highly stretchable and customizable microneedle electrode arrays for intramuscular electromyography. Science Advances, 10(18), eadn7202. DOI: 10.1126/sciadv.adn720213
- [8] Christensen M F, Sinkjaer T W, Lu Z, et al. Compound muscle action potential (CMAP) scan examination of paretic and contralateral muscles reveals motor unit alterations after stroke[J]. Journal of Neurorehabilitation and Neural Repair, 2020, 34(5): 456-465.
- [9] Research And Markets. Rehabilitation Equipment Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022-2027[R]. Dublin: Research And Markets, 2022.