

目录

1. 企业介绍	2
1.1 组织架构	2
1.1.1 总经理部门职责	2
1.1.2 采购部门职责	2
1.1.3 技术部门职责	2
1.1.4 市场运营部门职责	3
1.2 未来规划	3
2. 产品介绍	4
2.1 Design Thinking	4
2.2 市场背景	5
2.3 政策支持	5
2.4 问卷调研	5
2.5 用户画像	6
2.6 使用方法	7
2.7 商业模式	7
2.8 竞品分析	7
3. 技术实现部分	8
3.1 计算机视觉相关技术	8
3.1.1 OpenPose 神经网络	8
3.1.2 Simaese 神经网络	9
3.2 GymGPT 相关技术	10
3.2.1 Whisper 语音识别模型	10
3.2.2 人类反馈强化学习算法	10
3.3 数据库相关技术	11
3.4 电控相关技术	11
3.4.1 电控技术介绍	11
3.4.2 相关需求分析	12
3.4.3 仿真验证可行性	13
3.4.4 程序设计框架	15
3.5 机械结构相关技术	17
3.5.1 传动结构设计	17
3.5.2 设计产品大致功能和外观	18
3.5.3 力学仿真分析	21

1. 企业介绍

在本次项目中，本小组拟创立 AXTech——广州无穷智慧科技有限公司，且隶属于高新企业中的“先进制造与自动化”领域。本公司无穷智慧科技有限公司是一家专注于消费级、行业级智能机器人、灵巧机械臂自主研发、生产及销售的智能机器人公司。因为本公司涉及的技术栈为人工智能相关算法、语音处理和统计分析，所以公司在建立初期的主营业务主要会包括以下方面：技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广、软件开发、软件销售、智能机器人研发、智能机器人销售、工业机器人制造、工业机器人销售、机械设备研发、机械设备制造、机械设备销售、服务消费机器人制造、服务消费机器人销售。

1.1 组织架构

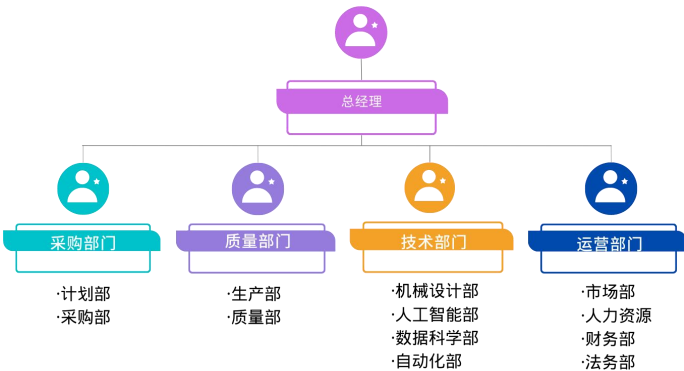


图 1 企业组织架构图

该公司为上层组织又**董事会、股东会、监事会**三大会有机组成，下设“一总四门”

1.1.1 总经理部门职责

负责制定公司的中长期战略进展规划,依照公司进展规划，研究市场动向、特点、进展趋势和竞争态势，分析公司经营治理状况，拟定经营方针、决策方案；

负责制定每年度的生产打算和经营目标、质量目标、治理目标;并负责费用的预算和审批；

治理及分配公司资源配备，研究公司厂房装修、重要设备的引进、新增服务项目工作，经常了解和掌握各种物资储备、采购情况，均衡生产，使产品质量、成本操纵等达到目标要求，对重要事务的审查、批准和处理

参与公司技术进展规划和新产品开发规划，拓展新客户领域和业务，审批年度营销方案，并监督方案的实施过程；

代表企业对外开展公关活动，包含政府单位、行业交流、媒体宣传等。

1.1.2 采购部门职责

采购所需零件及生产辅料等重要生产所需物资；负责择优选择零件、原料、辅料分供方，负责对分供方进行选点和生产能力评审工作，配合质量部做好产品质量评审工作；负责控制采购资金使用，配合财务部门做好采购物资的价格控制工作；做好降低采购成本工作；

负责公司生产物资采购合同的签订及管理工作；负责仓库各类规章制度的管理；负责外购件到货的协调；及时组织物资供应工作；负责库存状况的监控库位管理及规划；负责物资消耗定额管理；物资的先进先出批次管理；负责外购物资的及时供应、有效控制采购成本与费用。

1.1.3 技术部门职责

负责制定公司技术管理制度和产品技术及工艺相关标准；负责制定产品研发计划，明确各开发阶段节点要求，并按要求实施；按产品开发计划完成技术文件编制及图纸设计工作，

及时记录各种工作要素，编制齐全的技术文件，确保产品设计开发输出满足输入的要求；负责配合市场部对客户现场的定期走访，及时指导、处理、协调和解决生产过程中及客户处出现的技术和质量问题，保证生产正常进行满足产品发交及客户要求；

负责技术资料的归档管理工作；负责产品交付前后的调试验收相关技术工作；负责外购件及产成品的质量验收工作；负责新产品技术可行性分析、顾客及供应商对产品技术要求的确认、技术协议的签订；为产品投标提供技术支持；

1.1.4 市场运营部门职责

根据公司总体发展战略 编制公司的中长期发展规划拟定公司的年度经营计划经批准后负责实施并督导完成；’

根据公司业务发展方向，负责市场规划和业务拓展工作，扩大市场份额，建立完善公司市场运营体系；

负责搜集市场相关信息，进行市场调研与分析，研究同行、业界发展状况，定期进行市场预测及情报分析，为公司市场决策提供依据；

负责开拓并维护公司战略联盟、合作伙伴，提高公司竞争实力；
组建、管理市场运营团队，负责开发及拓展新客户，维护现有客情关系。

姓名	职位	工作内容
吕骏骐	技术部门主管 兼自动化部技术人员	负责参与监督各部门技术的实现方案和进度，同时负责电控方面的设计
胡健	技术部门 机械设计部技术人员	机械结构设计、力学仿真分析
吴壹凡	技术部门 数据科学兼 AI 算法部技术人员	技术部分 ，数据处理和分析、人工智能算法的搭建
沈采奕	市场运营部	市场调研、市场营销和业务拓展

表 1 团队成员任职表

1.2 未来规划

我公司计划于 2023 年 7 月 26 日成立公司，在经历前期市场调研，设计开发初版辅助健身机器人后，于 2023 年下半年推出我公司产品，同时上线 APP；2024 年上半年主要业务为打造口碑，加大品牌宣传力度，增加在社交媒体和健身社区的曝光度；2024 年下半年主要专注于技术创新和服务优化，根据智能健身科技的最新形式推出第二代智能健身机器人，优化服务；2025 年上半年我司将进行投资融资，扩大市场份额，吸引战略投资者；2025 年下半年我司将进军国际市场，走出国门，扩大业务范围



图 2 企业未来规划图

2. 产品介绍

本公司欲推出一款名为海格力斯（海格力斯为希腊神话中的大力神）的产品。海格力斯是一款面向单人健身用户的多功能辅助健身机器人，依托创新机械结构，结合 AI 深度学习算法与电子控制方案，实时监控用户的动作姿势，在用户需要帮助时及时助力，保障用户的健身安全。同时提供 AI 云教练服务，为用户个性化定制科学高效的训练计划，使运动更精准、更安全、更智能，实现健身全流程的数据化。



图 3 海格力斯健身机器人渲染图

2.1 Design Thinking

Empathize:我们经过讨论后发现一个现象，单人训练的时候有时候会出现被压的情况（手不够力完成一次动作）。于是我们针对这个现象，对健身者或者有意愿健身的目标群体进行了调研，经过调研和采访发现有以下原因：1.想冲重量却失败了 2.力竭组想要再做一次 3.没有教练帮助。从他们的角度出发分析这三个原因：第一点是因为当天觉得训练效果还不错，想要一鼓作气完成一次个人纪录，但是却失败了，这种情况的出现可能会导致下次感觉状态好的时候却不敢突破，或者单人训练的时候就一直担心这个问题而不敢突破。而第二点是因为希望能通过榨干自己的力量，用来达到更好的训练效果。而教练的话，一方面是因为私教的收费较高；另一方面教练的水平层次不齐，质量不一，可能交钱得到的服务配不上。从中我们知晓了他们的核心需求是“及时的保护”和“个性化的教练”。

Define:确定我们的服务对象是：想要健身却害怕危险或者没有教练的小白们以及一些需要辅助的，以及没有钱请私人教练的单人训练用户。用户能够在自己需要帮助的时提供助力，同时希望有可以指导自己动作，制定专业计划的教练。这些都是核心诉求。同时这是个公用的产品，我们不能配置那种贴身的装置，这样肯定会有人担心传染，卫生问题的。

Ideate:我们提出了几种解决方案，最开始想要直接采用机械臂的方式去辅助，有两个可以自由移动的机械臂然后去实现类人的辅助。但是这个方案对机械的设计要求很高，成本十分高，不利于我们去商业化，而且关于机械臂的构型机器人如果设计不好的话很容易造成危险，用户可能不太能接受这样外形毕竟还是会和自己近距离接触的机器人。就包括很多我们的调研，他们对于机器人最大的问题就是是否安全？然后第二个方案就是在现有器械的基础上，进行改造然后使其具有辅助的作用。关于这个问题我们采访过健身房老板，他认为这样会替换掉原有的旧器械，造成一定的经济损失的同时，他们的客户也可能开始会比较难接受这样子经过改造的器械。所以如果是在现有器械上进行修改的话，可能会较难售出，同时也加大我们自身的工作量，需要针对不同的器械进行对应的辅助功能改造。所以我们最后决定采用一种独立产品的方式，就是买来可以直接适配于现在健身房中大部分的器械使用的方式。而辅助的方式不能出现大型容易表现出危险性的装置（机械臂）。同时利用非贴身（耳机，

肌电传感器)的方式去检测一些必要的信息。

Prototype:首先关于动作姿态检测部分采用视觉方案去监督动作评分等,而要如何去判断用户的力竭状态呢,我找到一个参考文献,上面讲述了不同的运动动作他的速度和加速度的实时变化,这给了我们灵感。打算获取末端的速度和加速度的曲线,然后和正常状态/力竭状态下的曲线变化,来判断。故使用 IMU(惯性传导单元)获取数据,然后对数据处理之后能够判断出目标的状态。而 AI 教练部分打算用 GPT 的 api,然后引入一个 Gymgpt 的概念。最后辅助的方式打算采用线拉的方式,因为只需要一个电机,而且不会像机械手一样看起来很危险,并且辅助的实现方式非常简单。特别具有落地性。如果大部分智能化的功能(软件部分较难)无法完成的话,我们的想法是就保留电机拉动绳子给予助力的部分,然后可以在脚边放一个需要辅助按钮,当踩下去的时候就会提供助力,这是我们的最小可行性产品方案。

Test:我们通过仿真的方式验证了来自机械和控制的可行性,然后将我们的成品进行了接受度调研,发现健身人士的接受度但从这个外观构型,接受度高达 80%!我们估计以后需要迭代的方向就是机械结构的再次优化(辅助的角度),还有就是加上软件功能。或者引入耳机或者手表单独出售(可以收集到更加具体的生理信息),然后给予用户更加个性化的服务。

2.2 市场背景

中国智能运动健身市场规模不断扩大:中国智能运动健身市场规模在 2019 年已达到约人民币 100 亿元,预计 2025 年将突破约人民币 820 亿元,2021 年至 2025 年的复合增长率预计达到约 46%,中国智能运动健身市场处于快速发展阶段,前景大好。

中国健身器材行业市场规模不断扩张:中国健身器材行业市场规模达 546.5 亿元,同比增长 15%;健身器材制造行业完成营业收入 478.42 亿元,同比增长 21.06%,利润总额 24.19 亿元,同比增长 12.25%。市场肥沃,健身器材采购规模呈上涨趋势。

2.3 政策支持

国务院发布的《全民健身计划(2021—2025 年)》指出:“(八)推动体育产业高质量发展。推进体育产业数字化转型,鼓励体育企业“上云用数赋智”,推动数据赋能全产业链协同转型。促进体育资源向优质企业集中,在健身设施供给、赛事活动组织、健身器材研发制造等领域培育一批“专精特新”中小企业、“瞪羚”企业和“隐形冠军”企业,鼓励有条件企业以单项冠军企业为目标做强做优做大。”

2.4 问卷调研

该问卷自 2023 年 7 月 19 日发布,2023 年 7 月 24 日截至收集,历时五天,问卷样本面向组内成员朋友圈,三大高校学校论坛,样本总量为 214 份,有效填写人次为 214 份,问卷覆盖范围涉及中国绝大多数省份,问题经过“引用”和“逻辑跳转过后”涉及如下:

- 您的性别是?
- 您是健身资深爱好者、健身初学者、不健身?
- 您在健身房是否有过受伤或者较为危险的经历?
- 您认为健身房有哪些危险器材?
- 您不健身的原因?
- 如果健身房引入一种健身辅助机器人用于保障使用者安全,您是否会考虑去健身房健身?
- 您希望这款健身辅助机器人具备哪些功能?
- 您可能会担心这个辅助健身机器人的哪些方面?

参与填写本次问卷的有 54.46%的不健身人士,而该部分人群有 53.69%是因担心安全及缺少教练指导而不健身。这部分的人都是本项目的潜在目标客户,问卷表明,如果健身房引

进该款多功能辅助健身机器人的话，这部分人群想去健身的意愿达到六成！

问卷重点内容		
问卷结果	绝大多数受访者认为“卧推架”、“深蹲架”和“自由器械”属于健身房中的危险器械。	绝大多数受访者希望海格力斯具备“动作姿势评分与矫正”、“既往学习效果对比”、“专业训练计划个性化定制”、“体征监控”、“卧推被压及时卸力”等功能。

表 2 问卷调研表

2.5 用户画像

海格力斯产品初步定位的用户画像具有以下五大特征：

一、该群体**消费水平中等以上**，爱时尚、追潮流、懂**科技**，对新事物的接受程度较高，喜于尝试各类新型产品并测评，学习能力强，追求高品质生活。

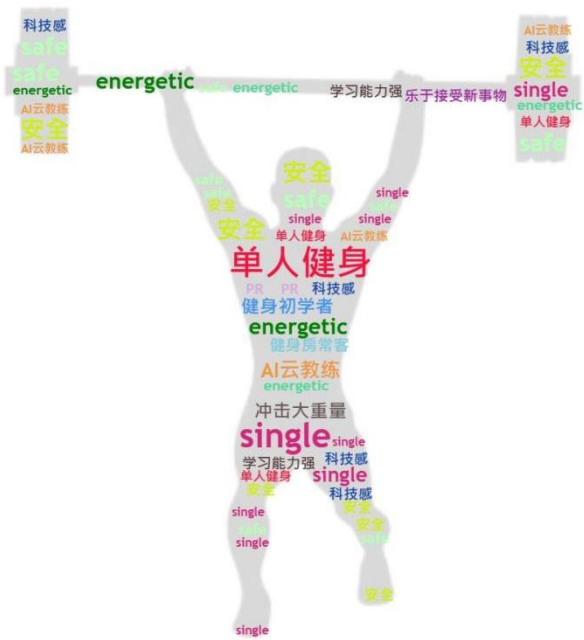
二、该群体以**单人健身人士**居多，这部分人群由于工作交友以及性格等诸多因素，常常独自前往健身房健身，在训练时经常有无法判断自己动作正确与否的烦恼，存在担心自己动作不到位、训练效果不佳的忧虑。

三、该群体可能曾经经历过或看到过卧推被压，深蹲被压等危险情况，存在不敢使用龙门架、史密斯架等危险度稍高的健身器械，**迫切希望有人在训练时辅助自己**或者指导自己，却又因现实原因没能实现的群体。

四、该群体涉及部分**潜在单人健身用户**，有些健身小白在尝试使用健身房器械觉得过于繁琐难懂、存在风险或者担忧有遗漏的步骤，怯于健身，急需有一种有着智能提醒，多功能辅助健身，且能保障自身安全的器械。

五、该群体主要涉及**各大健身房**，经了解，市面上健身房有**50%**左右的用户为单人健身用户群体，健身房老板急需一种多功能辅助健身器材帮助该群体实现安全无忧健身，减少健身房意外事故的发生，进而扩大健身房规模，用高品质、高保障服务容纳更多客户。

由此，我们设想了一条未来可能的销售对象，即购买群体分为健身房和居家健身者，



健身房在购买该设备后可提供给健身房内的单人健身用户，等待口碑成熟后，又可吸引潜在单人健身用户前往健身馆，无形中帮助健身房增加了客流量。

2.6 使用方法

用户通过扫码进入 APP 进行注册或者是登入，于是拥有了自己的数据。然后将产品带到要使用的设备旁边，然后固定之后，将末端固定在器械上。然后开始正常做动作就行了，当设备检测到用户当前的动作不正常（需要帮助的时候），电机就会给予助力。当检测到用户不需要助力的时候，绳子不会对用户造成各种影响。同时装置带有深度摄像头，自动可以帮用户记录当前动作以及对应的组数。还可以检测动作的完成度（打分），通过语音 AI 教练的方式辅助用户进行训练。

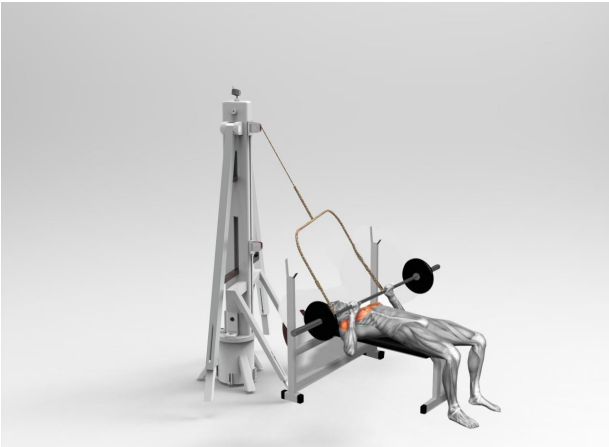


图 4 器械使用示范

2.7 商业模式

该商业模式由以下几个环节组成，AXTech 公司在运营过程中不断坚持经历研发、创新、变革、实验，项目团队采取“买服务送设备”的销售模式提供给健身房和健身器械公司，健身房和健身器械公司为研发团队提供反馈意见，研发公司再进行产品改进。研发团队向部分代加工生产商提供设备，代加工生产商再向原材料厂商购买材料，完成产品的制造。AXTech 公司根据用户需求，线下开设门店，线上开设公众号、小程序和官网，收集用户需求，倾听用户声音，以便更好地完善产品服务，实现产品升级。

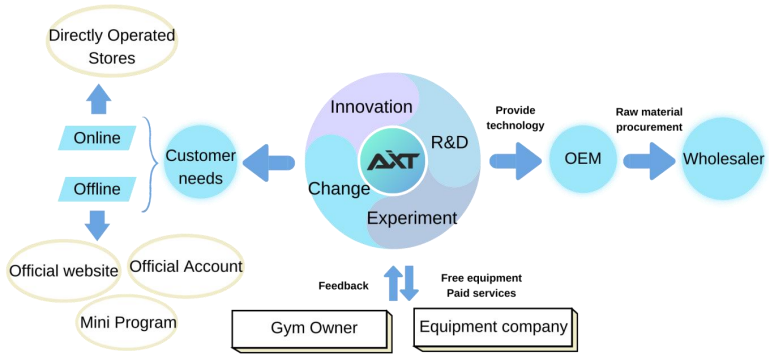


图 5 商业模式图

2.8 竞品分析

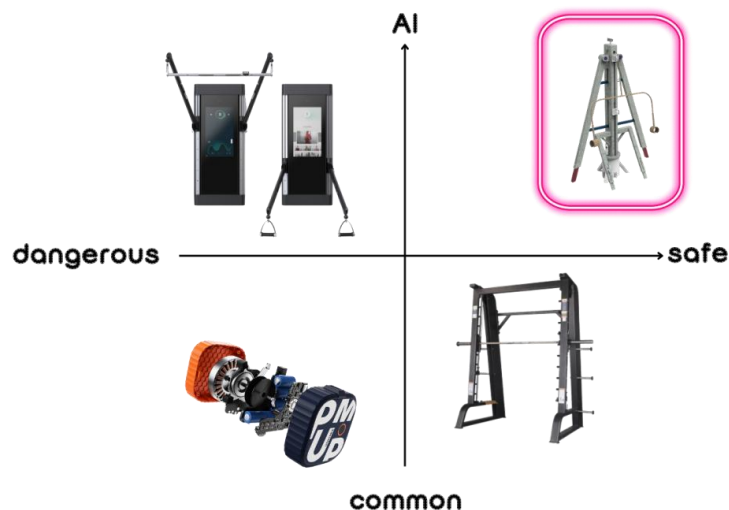


图 6 竞品分析图

通过四种产品在智能化和安全性两大维度上的对比，我们能够明显地看到，海格力斯凭借其突出的智能化优势和卓越的安全性能，从宇树健身泵、Tonal 健身镜、史密斯架中脱颖而出。

截至 2023 年，市场上尚未普遍出现专门用于健身的高科技保障安全的机器人。目前，智能健身设备主要集中在智能健身镜、智能健身设备和智能健身带等产品，它们通常配备了高精度的传感器、摄像头和人工智能算法，用于监测用户动作、提供实时反馈和指导。因此，海格力斯的商业前景十分可观。

3. 技术实现部分

3.1 计算机视觉相关技术

3.1.1 OpenPose 神经网络

OpenPose 是一个用于人体姿态估计的深度学习网络，它能够从图像或视频中检测和估计人体的关键点和姿态。在本次项目中，我们将产品使用者不同角度的健身照片作为 *OpenPose* 网络的输入数据，最终得到使用者的 3D 人体姿态图。

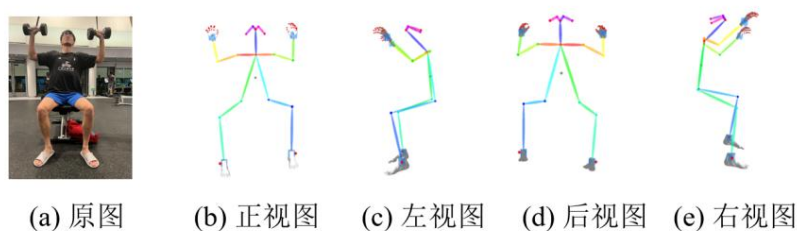


图 7 OpenPose 效果图

整个 *OpenPose* 的 *BackBone* 网络可以概述为“two-branch multi-stage network”，如图 7 所示。其中一个分支用于预测打分图 *confidence map(s)*，另外一个分支用于预测 *Par Affinity Fields(L)*，也对应着 *heatmap* 与 *vectormap*。

其中， $S = (S_1, S_2, \dots, S_j)$ ，表示 *heatmap*， j 表示要检测的关节数； $L = (L_1, L_2, \dots, L_c)$ ，表示 *vectormap*， C 表示要检测的关节对数。

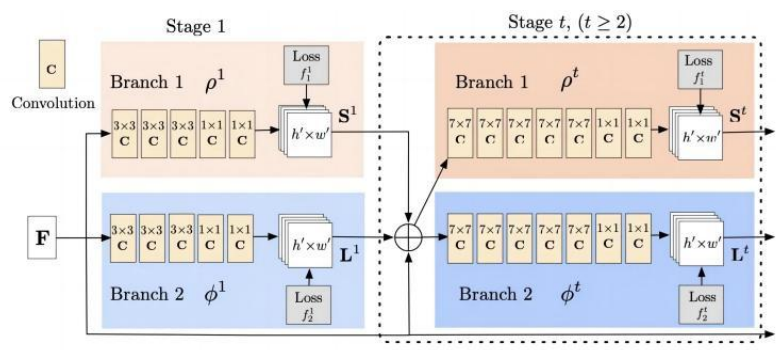
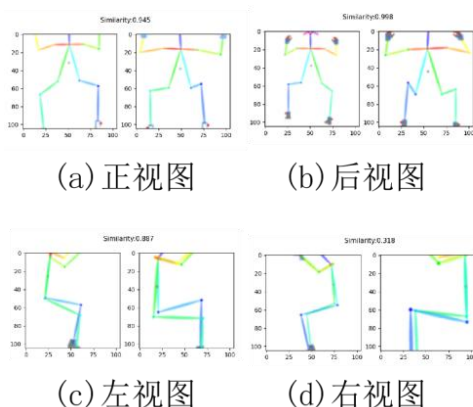


图 8 Backbone 网络结构

3.1.2 Simaese 神经网络

孪生神经网络 (*Siamese Neural Network*), 又名双生神经网络, 是基于两个人工神经网络建立的耦合构架。孪生神经网络以两个样本为输入, 其两个子网络各自接收一个输入, 输出其嵌入高维度空间的表征, 通过计算两个表征的距离, 例如欧式距离, 以比较两个样本的相似程度。



动作标准度: 0.795

图 9 利用 Simaese 网络对动作进行打分

Siamese 网络中的 *Backbone* 网络一般是单纯的卷积神经网络, 在最经典的 *Vgg* 版本的 *Siamese* 网络中, *Backbone* 网络使用的是 *Vgg16*。

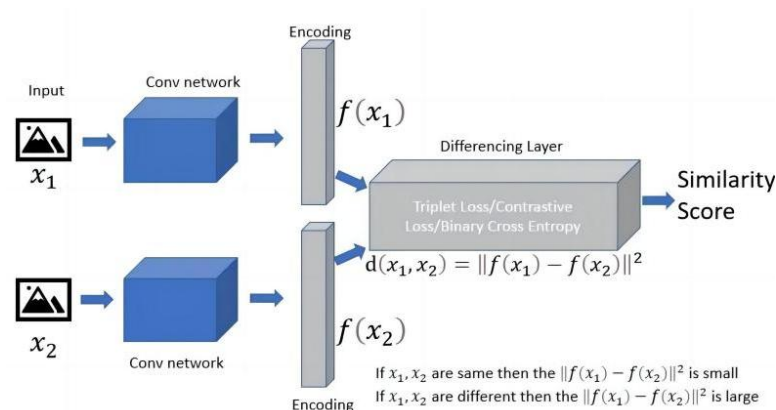


图 10 Simaese 的 backbone 网络

下图是 *Vgg16* 网络的网络架构图。在将图片输入到 *Vgg16* 网络之前, 我们通常会将图片的大小 *resize* 成 $224 \times 224 \times 3$ 的形状。 *Vgg16* 网络一共包括 13 个卷积层, 每个卷积层都使用 3×3 的卷积核进行卷积操作。卷积层之间都使用 *ReLU* 激活函数来引入非线性特征。

除此之外，在每两个卷积层之间，*Vgg16* 使用 2×2 的最大池化层来降低特征图的空间尺寸，同时保留重要的特征。在 13 个卷积层之后，*Vgg16* 有 3 个全连接层。每个全连接层都有 4096 个神经元。在最后一个全连接层之后，*Vgg16* 使用 *soft max* 层对每个类别进行分类，并输出概率分布。

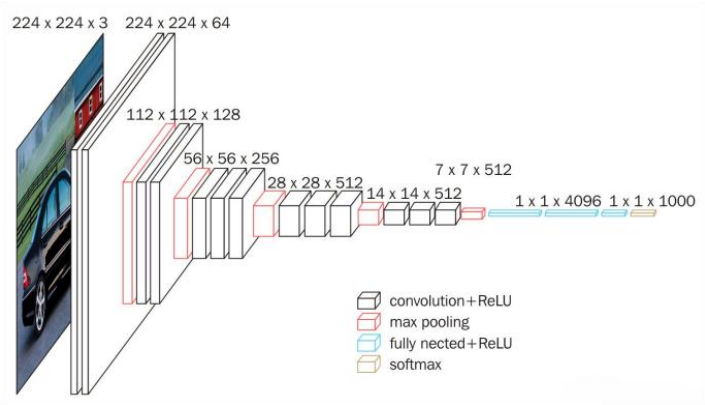


图 11 Vgg16 网络架构

3.2 GymGPT 相关技术

3.2.1 Whisper 语音识别模型

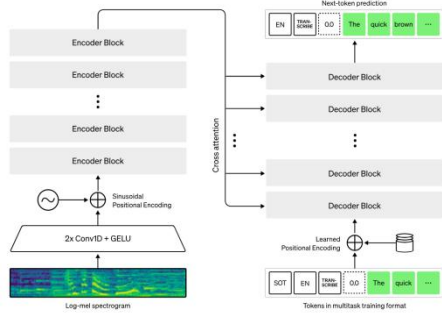


图 12 Whisper 网络架构图

该模型是标准的基于 *transformer* 的编码器-解码器架构。首先将对数梅尔声谱图输入到编码器，然后将编码器生成的最终隐含状态通过交叉注意机制输入给解码器。最后，解码器基于编码器隐含状态和先前的输出词，自回归地预测下一个输出词。

在序列到序列模型中，编码器负责从语音中提取出重要特征，将输入转换为一组隐含状态表征。解码器扮演语言模型的角色，处理隐含状态表征并生成对应的文本。我们把在模型架构内部集成语言模型的做法称为深度融合。通过深度融合，可以用同一份训练数据和损失函数对整个系统进行端到端训练，从而获得更大的灵活性和更优越的性能。

Start	End	Text
00:00:00....	00:00:07....	Good afternoon, my name is Wifan. I am a student of Nanjing U
00:00:07....	00:00:14....	My major is data science and big data technology. My GPA right
00:00:14....	00:00:18....	0.95 students in my major and I'm running the Fibs.
00:00:18....	00:00:26....	Regarding my academic performance, I believe I achieved good
00:00:26....	00:00:30....	and I also obtained good grades in English learning.
00:00:30....	00:00:43....	I obtained a score of 153 in 84 and a score of 596 in 86.
00:00:43....	00:00:51....	And I have also obtained seven points in use examination in reg
00:00:51....	00:00:59....	regarding scientific competitions. I have participated in many m
00:00:59....	00:01:05....	and I achieved a finalist award in ACM.

图 13 Whisper 模型的部分输出结果

3.2.2 人类反馈强化学习算法

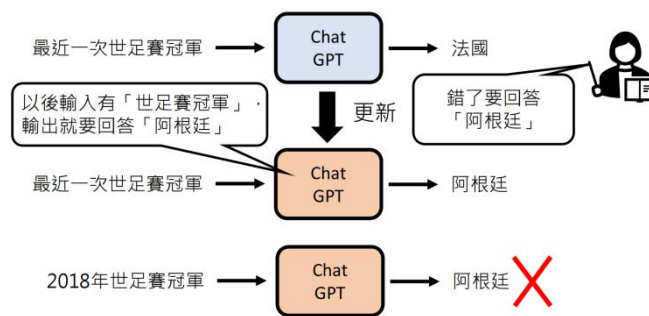


图 14 HFRL 算法示意图

人类反馈强化学习算法（*Human Feedback Reinforcement Learning*，简称 *HFRL*）是一种结合了人类专家的知识 and 反馈进行训练的强化学习方法。

在本次项目中 *HFRL* 的训练过程大致如下：

- 数据采集：首先，我们先让 *ChatGPT* 根据我们提供的健身文本信息库进行再训练，让 *ChatGPT* 此时具备对健身场景的专业回应。
- 人类反馈：将 *ChatGPT* 作出的回应呈现给健身领域的专家。专家根据自己的知识和经验，对智能体的行为进行评估和反馈。
- 反馈整合：将专家的反馈与智能体的策略进行整合，形成新的训练样本。
- 强化学习：使用整合后的样本对智能体进行强化学习训练，优化策略。
- 迭代优化：不断重复以上步骤，最终得到我们的 *GymGPT*。

HFRL 的优势在于通过利用人类专家的经验，可以加速智能体的学习过程，尤其在样本稀缺或复杂任务中特别有用。然而，也需要注意，如何高效地整合人类反馈，使得训练过程更加有效和可靠，仍然是一个需要进一步研究的问题。

3.3 数据库相关技术

在本次项目中，我们一共需要构建三个数据库，分别是健身文本数据库、个人健身数据库、脑波数据库（*pro* 产品功能）。在这里我们选择的数据库是 *MySQL*，它是一款强大、稳定且易于使用的关系型数据库管理系统，适用于各种规模的应用程序和项目。

我们首先先在 *MySQL Command Line Client* 命令行中用 *SQL* 语句创建相关的 *DataBase* 和每个 *DataBase* 中的 *Table*，接着我们用 *python* 中的 *pymysql* 库直接和本地数据库进行连接并将数据写入到对应数据库中。

```
mysql> SELECT * FROM mygym;
```

id	date	training_time	user_id	exercises	rest_time	exhaustion_count
1	2023-07-17	30	kuifan	卧推 3 哑铃划船 4	3	4
2	2023-07-17	30	吕俊琪	引体向上 4 高位下拉 4 哑铃硬拉 4	3	4
3	2023-07-17	40	胡健	深蹲 4 器械腿推举 4 哑铃侧举 4	4	6
4	2023-07-17	40	沈东奕	哑铃上斜卧推 3 哑铃卧推 4 杠铃上举 3	5	6
5	2023-07-18	40	梁豪凡	引体向上 4 高位下拉 4 哑铃硬拉 4	3	5
6	2023-07-18	40	吕俊琪	深蹲 4 器械腿推举 4 哑铃侧举 4	5	8
7	2023-07-18	35	胡健	哑铃上斜卧推 3 哑铃卧推 4 杠铃上举 3	4	7

(a) 健身记录数据库

```
mysql> SELECT * FROM mybrain;
```

id	time	alpha_wave	beta_wave	delta_wave	theta_wave
1	0.998976	0.000000000000193	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000186
2	1.000041	0.0000000000000070	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000579
3	1.002186	0.0000000000000116	-0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000079
4	1.003971	0.0000000000000068	-0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000177
5	1.006536	0.0000000000000042	-0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000023
6	1.007381	0.0000000000000029	-0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000012
7	1.008965	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000116
8	1.010331	0.0000000000000029	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000025
9	1.012196	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.000000000000000
10	1.011961	0.0000000000000079	-0.0000000000000000	-0.0000000000000000	0.000000000000016
11	1.015636	0.0000000000000000	-0.0000000000000000	-0.0000000000000000	0.000000000000004
12	1.017291	0.0000000000000000	-0.0000000000000000	-0.0000000000000000	0.000000000000013
13	1.018956	0.0000000000000029	-0.0000000000000000	-0.0000000000000000	0.000000000000007

(b) 脑部数据库

图 15 部分数据库展示

3.4 电控相关技术

3.4.1 电控技术介绍

电控一般被分为两个部分：电路部分和控制部分。电路部分负责的工作是设计电路板去

实现需要的功能，例如各种模块之间的通信，*IMU*（惯性测量单元）模块等；控制部分负责在上位机即主控部分进行编程，负责进行数据的采集，同时发送具体的控制指令给对应的设备。本次工作主要负责控制部分的实现，而电路部分由于缺少相关的人才实现因此相关电路部分会采用抽象的方式。

本次电控方案采用控制框架 *ros-controls*，一套在 *PC* 上运行的无下位机、视控一体软件和配套硬件，基于 *ros-controls* 的硬件和仿真接口以及配套控制器，可以基于自己的需求去开发目标机器人。

ros-controls 提供这样的机制：执行器 (*Actuator*) 的编码器等传感器数据被读取后通过 *Transmissions_Interface* 映射成关节 (*Joint*) 等机器人状态，将这些状态接口提供给控制器；经过控制器计算后得到关节指令经过限制，再映射为电机的指令，发送给电机。控制器管理器可以实时加载、开始和停止各种控制器（以动态库的形式编译）。

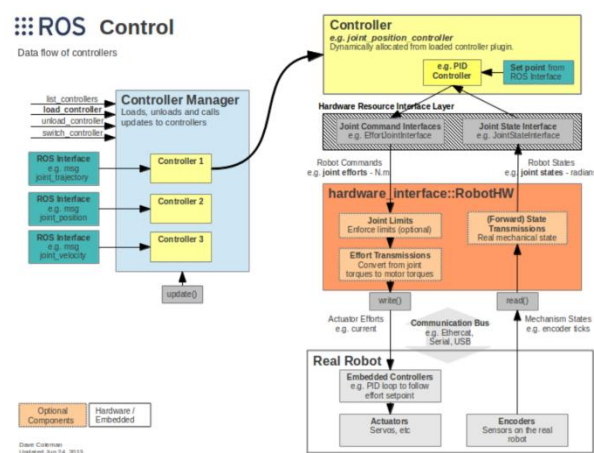


图 16 ROS 控制框架图

3.4.2 相关需求分析

将通过对于健身动作（以卧推举例）的受力分析与实际考虑，来确定最终控制的需求。受力分析如图 11 所示：

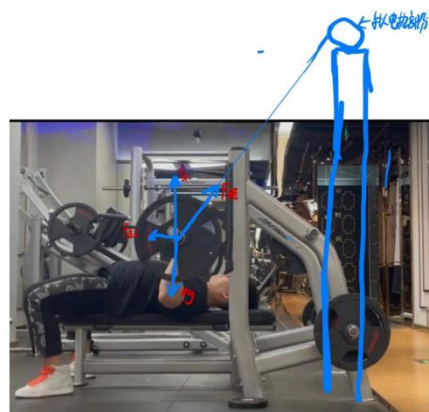


图 17 卧推的受力分析图

站在健身爱好者的角度分析,当正常训练不需要辅助的时候是不希望存在任何方向的辅助力的;而当需要助力辅助的时候该绳方向正好提供了向上且器械放置方向上的助力。所以,不需要助力的时候绳子应该时刻处于刚好紧绷(不会影响到用户)的状态;而需要助力的时

候绳子可以直接提供一个拉力即可。

前者的控制器逻辑如图 12 所示：



图 18 前者控制器逻辑示意图

当绳子上的力小于某个值（视为绳子松弛阶段），而为了控制器能起到实时保护的作用，绳子应该是刚好紧绷的状态，所以此时控制器需要往正方向（绳子绷紧的方向）输出小力矩以绷紧绳子；而当绳子的力大于某个值（视为可能会影响到用户），此时控制器需要往反方向输出力以抵消绳子上的力使其保持刚好紧绷的状态。

而后的控制器逻辑如下：



图 19 后者控制器逻辑示意图

其中的数值确定都需要在研发阶段确定，并且能根据用户的具体信息灵活调整。

3.4.3 仿真验证可行性

该控制过程较难通过 *gazebo* 仿真出比较直观的结果，因此选择使用 *matlab* 去模拟使用场景下实际控制器的作用。

首先根据实际的控制器逻辑编写了控制器逻辑（为了方便判断结果所以采用简单的数值设置）：

```
function controller_output = controller(symbol, f_rope)

controller_output = 0; % 设置默认值

if symbol == 0
    if f_rope <= 0.05
        controller_output = 0.1; % 为了正转
    elseif f_rope > 0.05
        controller_output = -f_rope;
    end
elseif symbol == 1
    controller_output = 30;
end
end
```

首先针对不需要助力模式下的 *simulink* 模型搭建如下：

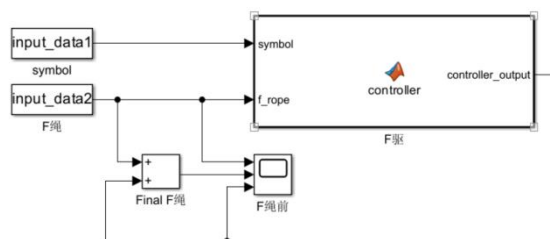


图 20 无助力模式下的 simulink 模型

其中 *symbol* 表示是否需要助力信号（该情况下始终为 0），*F* 绳即力矩传感器感受到的值，我将其从 0 逐步变化到 0.12 以探究不同拉力下控制器的输出的变化。*F_Final* 绳就是用户最终能感受到的绳子上的拉力。得出来的波形图如下：

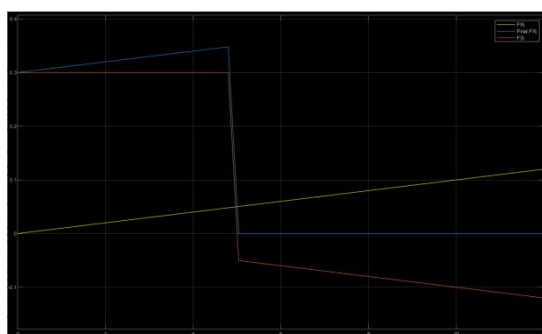


图 21 波形结果图

观察最终力的输出（蓝线），可以观察到当 5s 绳子不会对用户造成影响，电机一直往正方向输出力使得绳子绷紧；而当 5s 后绳子可能会对用户造成影响的时候，电机反方向输出力抵消了拉力，使得绳子上的拉力为 0，故全过程不会对用户造成影响。该部分控制器仿真理论成立。

接下来针对需要助力模式下的 *simulink* 模型搭建如下：

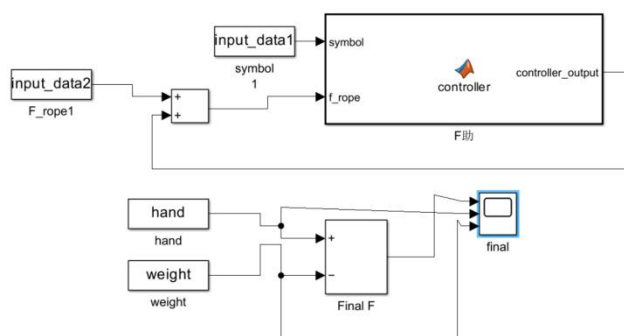


图 22 助力模式下的 simulink 模型

该模式下的 *symbol* 输入始终为 1，然后由于绳子是处于绷紧的状态所以 $F_{驱} = F_{绳}$ ，直接将电机输出作为绳子拉力输入。下半部分是模拟卧推过程中的用力，*weight* 是杠铃的重量，*hand* 就是手的支持力会随着时间的变化而减小力量。当不接入控制器时候的 *F_Final* 变化如下：

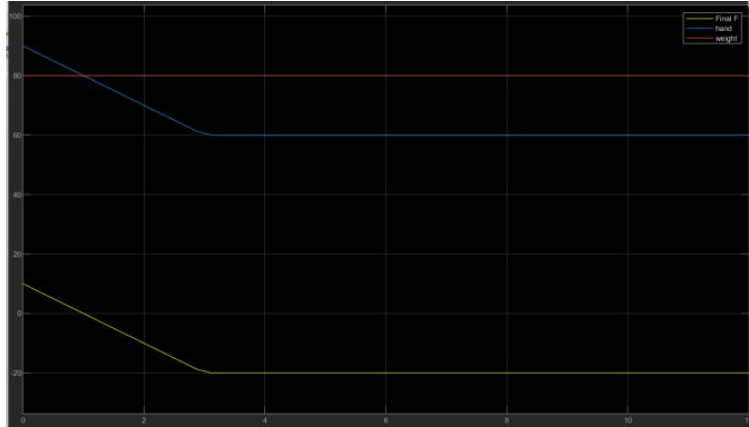


图 23 波形变化示意图

可以观察到，当 1s 时候，手的力量小于杠铃的重力时候，最终合力方向为负数，即杠铃向下压存在受伤风险。

而当我接入控制器时候，仿真模拟图如下图：

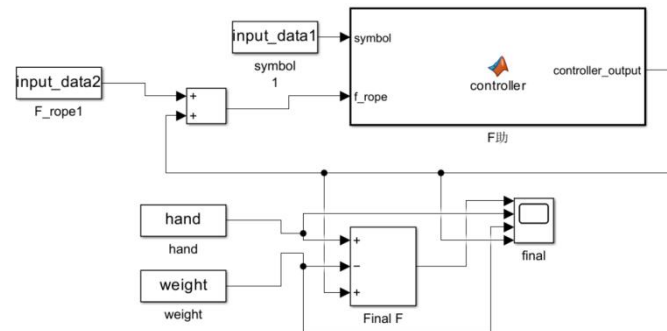


图 24 接入控制器时的仿真模拟图

最终曲线结果如下：

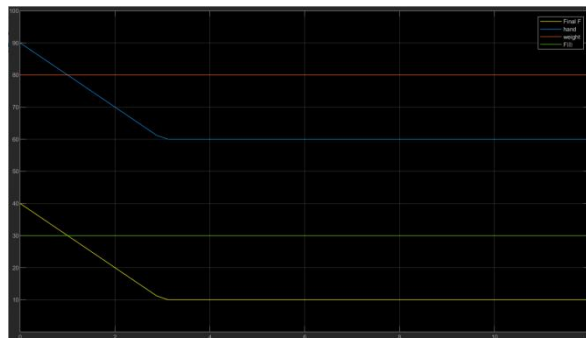


图 25 波形最终曲线图

可以观察到电机实时给予一个 30N 的助力，用来保证合力向上以帮助用户完成该次动作。至此，我们已经通过 *matlab* 验证了该控制器的可行性。

3.4.4 程序设计框架

程序由多个 *Ros package* 构成，其中有元包：*rm-control* 提供了底层硬件和仿真的通用接口，元包 *rm-controllers* 则为中间层各模块控制器，还有普通机器人操作包 *rm-manual*。

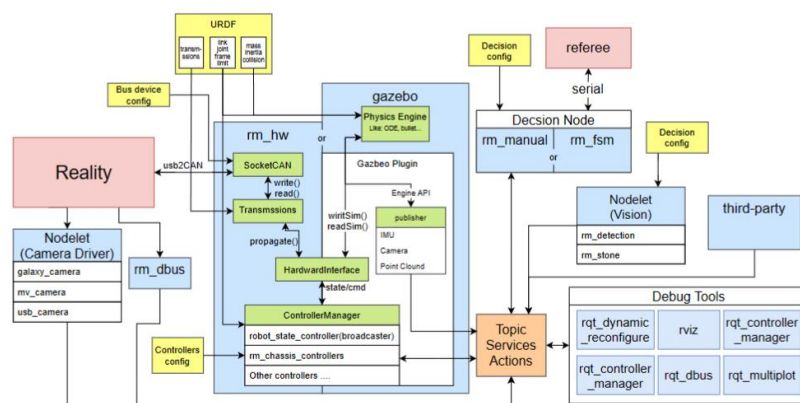


图 26 Ros 程序结构图

- *rm-control*
 - *rm-msgs* 自定义的 *Ros* 话题消息、服务、动作
 - *rm-common* 常用函数、算法
 - *rm-description* 所有机器人的 *URDF*，定义了：机器人各坐标系关系、电机与关节的映射、关节的限位、仿真需要的物理属性
 - *rm-hw*, *hardware_interface* 节点通过 *SocketCANrm-hw* 与执行器进行通信获取数据并发送指令，在实车运行时提供硬件接口给控制器
 - *rm-gazebo* 同名 *Gazebo Plugin* 在仿真运行时提供硬件接口给控制器
- *rm-controllers*
 - *fitness-controllers* 辅助健身主电机驱动器的控制器。
 - *gimbal-controllers* (待定是否使用) 可能存在的云台控制器
- *manual* 机器人决策层
- *AI* 智能化处理层
- *Data_deal* 数据处理层
- *Visual* 视觉识别层

下面展示该辅助健身机器人的 *Ros* 节点图:

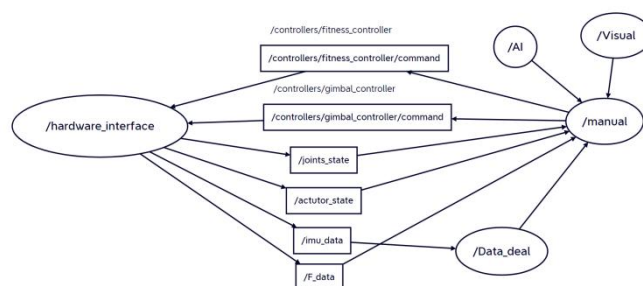


图 27 机器人 ROS 节点图

其具体逻辑是：`hardware_interface` 通过与接收电路或者电机的数据包，然后解包后发布出来（包括电机的状态，*imu*（用来测量速度和加速度）的数据，力矩传感器的数据）。其中*imu*的数据发送给 *Data_deal* 节点，用来匹配后台大量数据以及各种具体判断出用户当前的状态是什么，然后将其发送给决策层 *manual*。同时外部 *AI* 和 *Visual*，智能和视觉

部分也会给予一定的信息给决策层。*manual* 将信息处理之后将指令发送给控制器 *fitness-controller*，然后 *hardware_interface* 将数据打包后发送给对应的电机。

3.5 机械结构相关技术

3.5.1 传动结构设计

主要目的并不是承受重物所有的力，而且若选用液压结构，所需液压供油泵体积过大、重量过重，不适宜于我们运用的健身房的应用场景，因此此处选用斜齿轮啮合传动结构，运用机械设计相关专业知

识，考虑实际情况，对设计参数进行简单计算，计算过程与结果如下：
查《机械设计课设指导书》得圆柱齿轮传动常用传动比为 3-5，此处设计受限于空间，取较小传动比 $i=3$ 。由于电机可以控制反转对健身器材下坠的力进行抵抗，且下坠速度一般较慢，因此电机与齿轮轴不需要通过皮带进行一次减速，而直接通过联轴器与齿轮轴进行连接。

设计数据：由于负载力大部分时间较小，但为求极限状态，取 $F = 3.9KN$ ，速度由电机转动角速度转换，取 $v = 0.5m/s$ ，则电动机功率 $P_d = 1kw$ ， $P_0 = P_d = 3kw$

$$T_0 = \frac{9550P_0}{n_0} = 286.5N \cdot m$$

$$\eta_{总} = \eta_{齿} \cdot \eta_{联} = 0.97 \cdot 0.99 \cdot 0.99 = 0.9506$$

①齿轮传动计算验证：

1)选材料与热处理

所设计的齿轮近似可看成闭式传动，则选用软齿面的钢制齿轮，小齿轮为 45 钢(调质处理)，硬度 260HBW，大齿轮也为 45 钢(正火处理)，硬度 215HS

2)选择精度等级

我们设计的该健身器材为一般机械，速度较低，则选择 7 级精度

3)初选齿轮齿数

$$Z_1=60, Z_2=Z_1/i=20$$

4)初选压力角 $\alpha = 20^\circ$ ，螺旋角 $\beta = 14^\circ$

②按齿面接触疲劳强度设计

计算小齿轮分度圆直径(此处忽略参数计算过程):

$$d_{1t} \geq \sqrt[3]{\frac{2K_{Ht}}{\Phi_d} \frac{i_1}{i_1} \left(\frac{Z_H Z_E Z_\epsilon Z_\beta}{[\sigma_{Ht}]} \right)^2}$$

接触疲劳许用应力：

查得小齿轮和大齿轮接触疲劳极限分别为 $\sigma_{Hlim1} = 600MPa$ ， $\sigma_{Hlim2} = 550MPa$

应力循环次数 $N_1=60n_2iL_h=4.017 \times 10^9$ ， $N_2=N_1 \times i_1=4.017 \times 10^9 \times 3=1.2 \times 10^{10}$

查取接触疲劳寿命系数 $K_{HN1} = 0.87, K_{HN2} = 0.90$ ，

取失效概率为 1%，安全系数为 $S=1$ ，则

$$[\sigma_H]_1 = \frac{K_{HN1} \sigma_{Hlim1}}{S} = \frac{0.87 \times 600}{1} = 522MPa$$

$$[\sigma_H]_2 = \frac{K_{HN2} \sigma_{H\lim2}}{S} = \frac{0.90 \times 550}{1} = 495 \text{ MPa}$$

取其中较小值作为该齿轮副的接触疲劳许用应力，即 $[\sigma_H] = [\sigma_H]_2 = 495 \text{ MPa}$

计算小齿轮分度圆直径（圆整后） $d_{1t} = 50 \text{ mm}$

根据 $v = 0.5 \text{ m/s}$ ，7 级精度，

$F_{t1} = 2T_0/d_{1t} = 358.125 \text{ kN}$ ，考虑强度，取齿厚 $b = 40 \text{ mm}$

则齿轮的圆周力： $\frac{K_A F_{t1}}{b} = 95 \text{ N/mm} < 100 \text{ N/mm}$

由实际载荷系数算得分度圆直径： $d_{1H} = d_{1t} \sqrt[3]{\frac{K_H}{K_{Ht}}} = 57.96 \text{ mm}$ ，

相应齿轮模数： $m_{nH} = \frac{d_{1H} \cos \beta}{z_1} = 1.405$ ，从满足齿根弯曲疲劳强度出发，从标准值中取

模数 $m_n = 1.5 \text{ mm}$ ，分度圆直径圆整为 60 mm

大齿轮的计算过程同上，不再赘述，直接给出设计结论

代号名称	小齿轮	大齿轮
模数 m	1.5 mm	1.5 mm
齿数 z	40	120
螺旋角 β	右 14.806°	左 14.806°
齿宽 b	40 mm	60 mm
齿顶高系数 h_a	1.0	1.0
分度圆直径 d	57.96 mm	152.65 mm
顶隙系数 c	0.25	0.25
材料	45 调质 (260HBS)	45 正火 (215HBS)

表 3 齿轮设计参数

由于此机构的受力较小、且受限于时间，因此此处忽略齿轮轴的设计与校核强度步骤

③Solidworks 齿轮三维建模图

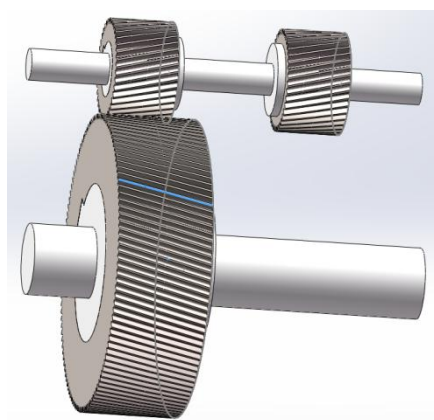


图 28 齿轮转动结构

3.5.2 设计产品大致功能和外观

目前，健身房主流健身器具主要有杠铃、哑铃等，主流健身方式有硬拉、卧推、飞鸟、上拉等等，施力方向大多为上下、左右，所需保护力为上拉力。

由于所需辅助仪器给予的力的方向大部分为上下、前后，因此初步设计整体仪器结构为“长条形”，可放置于健身人员前方或后方，如下图所示：



图 29 整体结构图

由于健身所用的器材各异，因此选用绳子作为施力的器具，可搭配不同的末端柔性夹持器，为了满足上下、前后施力（两种受力分析如下图 4）

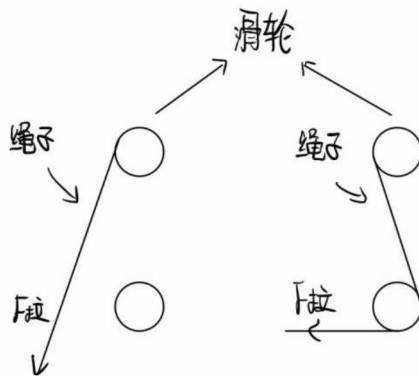


图 30 两种受力分析

设计了双滑轮结构，只使用上方定滑轮的时候，可施加向上的拉力，若同时使用上方定滑轮和下方动滑轮时，可以将向上的拉力转换为前后的拉力，几种不同的受力方式及其针对的健身器具如图 30 所示

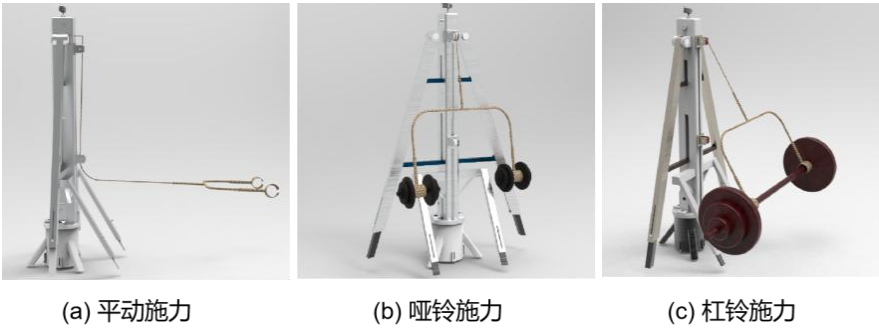
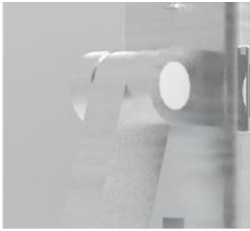


图 31 不同器材的受力方式

同时，下方滑轮可在导轨内上下滑动，可实现绳索拉伸角度的灵活可调性，角度范围（与主体竖直结构）为 90° - 150° ，动滑轮及其滑动槽结构如图 31 所示，



(a) 动滑轮及其滑动槽



(b) 支撑杆连接铰链

图 32 动滑轮及其滑动槽结构

由于仪器整体重心较高，则需要给予多向支撑力防止仪器发生倾覆，左右两侧支撑杆可由上图看出结构，同时，为了保证收纳的灵活性，两侧的支撑杆可收回，上端使用如图 31(b) 铰链进行连接，由此则在主体左右两壁上设计卡槽如图 32。

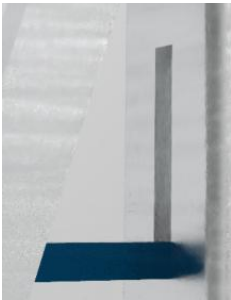


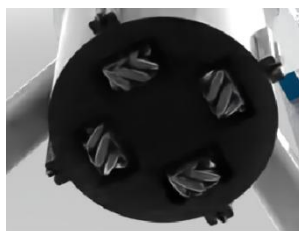
图 33 卡槽设计

这样可将顶住支撑杆的连杆收回到卡槽中，同时由于勾股定理，斜边长于直角边，支撑杆长度必定长于主体，因此需要考虑将支撑杆长度设计为可变模式，基于此，设计了如图 33 所示的伸缩结构，内部可随时卡住

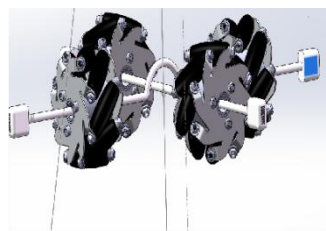


图 34 伸缩结构

为了保证整个装置的可移动性以及移动过程的稳定性，我们选择在底座加入四个麦克纳姆轮如图 34(a)所示（万向轮），可以实现全方向无障碍移动，同时，内部通过下图所示变形连杆结构，配合滑槽，轻松实现轮子释放与收回



(a) 麦克纳姆轮

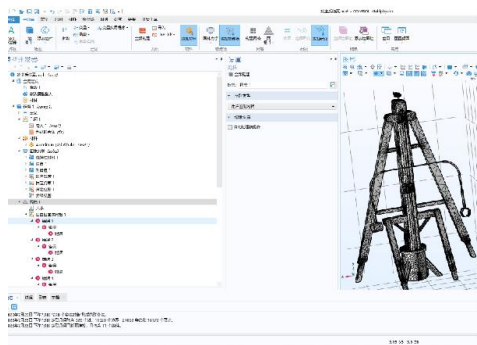


(b) 变形连杆结构

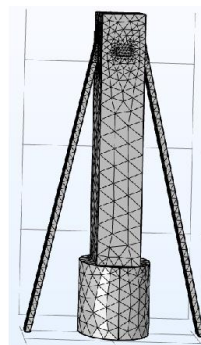
图 35 麦克纳姆轮外观及其内部结构

3.5.3 力学仿真分析

在对整体进行建模之后，我们通过有限元分析的方法，利用仿真软件对整体结构受力进行分析，具体分析过程如下：一开始，直接将整个装配体导入仿真软件中，由于零件个数过多，导致网格划分出现失败的情况，因此后续，将装配体画为结构相同的单一零件进行分析，替代装配体，减少计算量，情况如下图所示：



(a) 网格划分失败界面



(b) 模型简化后划分情况

图 36 零件分析情况

对一开始的结构进行分析，如图 14 所示，由于受力点为装置前方，后方的支撑杆所受的力较小，而前端变形与连接处受力较大，因此此处将后方支撑杆去除，增加前方的支撑杆；

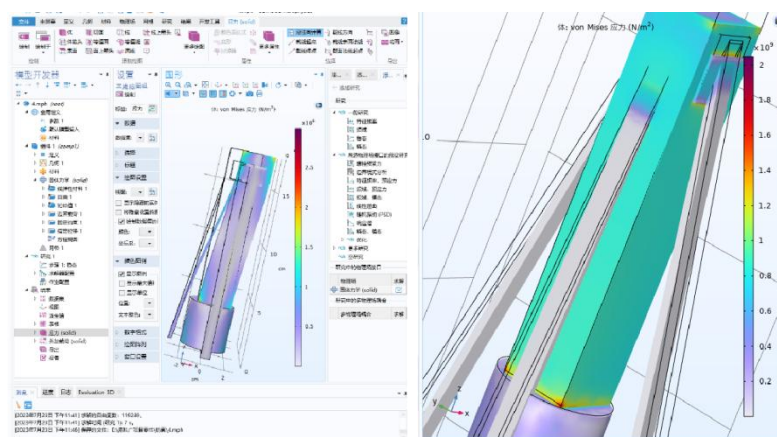


图 37 未改进结构仿真分析结构

改进后的结构及其仿真如下图 37 所示

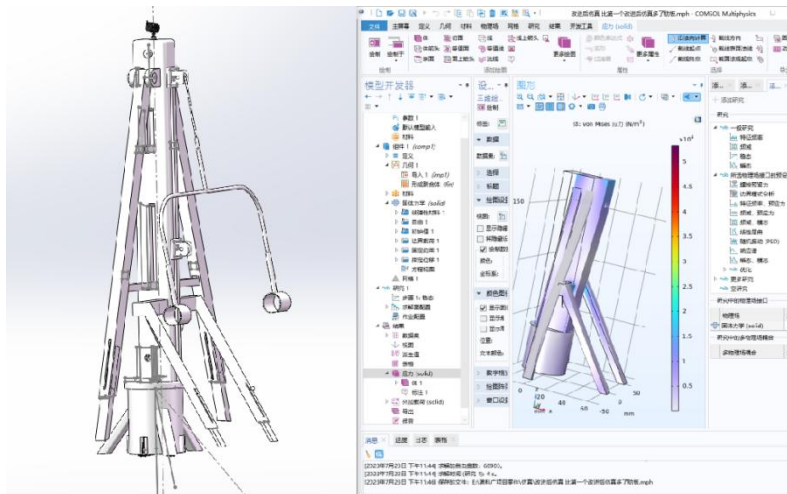


图 38 改进之后的仿真分析

仿真结果显示，由于前端支撑杆受力较大，导致变形程度较大，因此在前端支撑杆上增加肋板，结构与仿真结果如图 38 所示

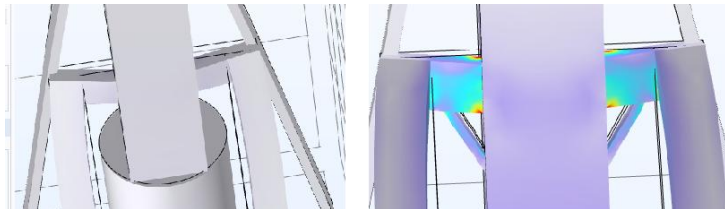


图 39 有无前肋板之后的变形