



第十一届全国大学生 机械创新设计大赛

大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置

设计 说明 书

学校名称：_____吉首大学_____

设计者：_____张航、吴辉传、刘宇航、唐家兴、孙凯_____

指导老师：_____毕仁贵、严灿_____

参赛组别：_____兴农机械_____

大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置说明书

摘 要

莲藕是一种美味又营养健康的食品，极受广大民众喜爱，在国内的需求在不断地增长，因此莲藕产业的规模也是在稳步上升，发展前景十分明亮。与此同时，随着莲藕需求与产量的上升，为了克服人工挖藕存在的成本高、劳动强度大、工作效率低等弊端，高效率、高质量、机械化和自动化的采藕机自然成了莲藕农业装备产业发展的重点。采藕农机目前任然处于半机械化状态，研发适合家庭农场、专业合作社和大型种植户等经营主体的规模化种植的莲藕智能高效采收装备的需求日益迫切。我们团队广泛吸收了各类采藕机械的如自动船式挖藕机和自旋式挖藕机的优点，并加以改善设计了一种成本较低、结构简单、机械化自动化较高的采藕机械，同时利用三维建模软件对其进行建模。我们团队的采藕机在高压水流冲刷莲藕的基础功能的基础之上，还设计了喷水口旋转、上下升降，远程遥控等功能，尽可能地提高采藕的效率与质量，为农业采藕机械装备的发展做出自己小小的贡献。

关键词： 莲藕；收获装置；三维建模；高压水流冲刷

Abstract

Lotus root is a delicious and nutritious and healthy food, which is very popular with the general public, and the demand in China is growing, so the scale of the lotus root industry is also rising steadily, and the development prospects are very bright. At the same time, with the rise of lotus root demand and output, in order to overcome the disadvantages of high cost, high labor intensity and low work efficiency of manual lotus root, high-efficiency, high-quality, mechanized and automated lotus root harvesting machine has naturally become the focus of the development of lotus root agricultural equipment industry. At present, the lotus root harvesting agricultural machinery is still in a semi-mechanized state, and the need to develop intelligent and efficient lotus root harvesting equipment suitable for large-scale planting of family farms, professional cooperatives and large-scale growers is becoming more and more urgent. Our team has extensively absorbed the advantages of various types of lotus root harvesting machinery, such as automatic boat type lotus root digging machine and spin type lotus root digging machine, and improved and designed a kind of lotus root harvesting machine with low cost, simple structure, high mechanization and automation. On the basis of the basic function of high-pressure water flow to wash lotus root, our team's lotus root harvester has also designed the functions of water nozzle rotation, up and down lifting, remote control, etc., to improve the efficiency and quality of lotus root picking as much as possible, and make its own small contribution to the development of agricultural lotus root harvesting machinery and equipment.

Key words: Lotus root; Harvesting device; 3D modeling; High-pressure water flushing

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 目标	1
1.2 应用背景	1
1.3 当前国内外研究现状	2
第二章 整体结构设计.....	2
2.1 设计要求	2
2.1.1 舵机的选型	2
2.1.2 电机的选型	3
2.1.3 水泵的选型	4
2.1.4 莲藕结构分析	5
2.2 机架设计	6
2.2.1 机架主体材料与尺寸	7
2.2.2 机架的连接	7
2.3 升降装置设计	8
2.4 水射流系统设计	9
2.4.1 喷管设计	10
2.4.2 射流的破裂机制分析	10
2.4.3 喷嘴参数计算	11
2.4.4 喷嘴结构优化	12
2.4.5 喷管位置设计	12
2.4.6 喷管自转动与随升降层垂直偏移运动设计	13
2.5 整体机身动力行走系统设计	16
2.5.1 浮板部分	16
2.5.2 驱动部分	17
2.6 收集系统设计	17
2.6.1 传送机构设计	17
2.6.2 收集篮设计	19
2.6.3 履带结构合理性验证	19
2.7 机身外形设计	20
第三章 控制系统设计.....	21
3.1 硬件控制原理	21
3.2 硬件系统设计	22
3.3 软件系统设计	23

第四章 样机的集成与实验测试.....	24
4.1 样机集成	24
4.2 工作原理	27
4.3 实验测试	28
第五章 创新点与推广应用价值.....	30
5.1 作品创新点.....	30
5.2 推广应用价值	30
5.3 产品对比	31
参考文献.....	33

第一章 绪论

莲藕是睡莲科植物荷花的根茎，其在各个方面都展现出了巨大的价值，且本身的价值使其在市场中产生了极大的市场效益。但莲藕本身采摘难度较大，市场上并无功能较为完备的莲藕收获装置。

1.1 目标

这个项目的目标是建造一个功能较为全面，相较于市面上现有采莲藕机器具有明显优点且价格较为经济的莲藕采收一体化收获装置。这个收获装置的目标用户是我国南方地区种植莲藕面积较大的省份地区，如湖南，江苏等省份。未来将利用该装置初步实现我国莲藕采收一体化。

1.2 应用背景

莲藕是睡莲科植物荷花的根茎，一般生长在 20cm 至 40cm 深的泥田里，虽然被深埋在淤泥中，但这丝毫不妨碍受中国人民乃至世界人民的喜爱。莲藕微甜而脆，其富含维生素 C、优质蛋白与钙等营养，可生食亦可做菜，常常会出现在中国居民的饭桌上，是一道十分受欢迎的美食。与此同时莲藕还具备极高的药用价值，莲藕粉在消食止泻、滋补养性、开胃清热和预防内出血等方面很有效果，是妇孺童叟、体弱多病者上好的流质食品和滋补佳珍。在我国市场内，莲藕产业具备良好的发展前景，莲藕是我国种植面积和产量最大的水生蔬菜品种，具有良好的经济效益和营养价值^[2]。近几年来，莲藕产业在不断持续地扩张，2022 年莲藕产业市场规模已经达 658.03 亿元，其需求与产量也相当巨大，2022 年中国莲藕产量和需求分别达 1268 万吨和 1265 万吨。除国内市场外，莲藕在国外的需求也是逐年上涨，2022 年中国出口量达 2.55 万吨。莲藕在各个方面都展现出了巨大的价值，其本身的价值使其在市场中产生了极大的市场效益。

莲藕虽然美味，但是这美味却难得。莲藕一般深埋于泥塘的 20cm 至 40cm 处，很难被直接观察到，专业的挖藕师傅需要依靠经验摸索寻找它，首先需要确定后把叶与终止叶的位置，而莲藕就在这两叶的连线的前方，其过程劳动强度大，劳动效率低，对于没有经验的人就更难采收出好质量的莲藕。长时间的弯腰工作，再有经验的师傅都很难承受得住高强度的工作。那对于没有疲惫的机器呢？因为莲藕极易损坏并且损坏的价值不高，所以采收莲藕的过程要及其细致，机器采收更是要求能柔性的进行工作。无论是人工采收还是机器采收都面临采收质量、效率等问题。

我们针对上述问题。首先，设计了冲刷式冲淤泥挖取莲藕结构，可以高效采

集的同时保护莲藕自身结构完整。其次设计了采用行星齿轮传动结构,实现了水射流喷管喷射角度可调,可在同位置大面积挖取莲藕。然后我们采用丝杆传动结构,实现了水射流喷管高度可调,可自适应升降喷管高度,适应不同水深作业。最后,采用链式网带收集装置,实现采收一体化。

1.3 当前国内外研究现状

莲藕原产于印度,由于莲藕种植地与认识度的不同,莲藕机械发展的中心主要在亚洲,尤其是东南亚,其中我国与日本对采藕机械的研究有较大的发展。在我国采藕机主要有船式自动挖藕机、浮桶鸭嘴式挖藕机、自旋射流式挖藕机、自走式水压莲藕掘取机,这四种采藕机各有优势,但或多或少存在一些问题,现对这四种产品进行介绍并与我们的产品进行对比。

4CW0-3.2 型船式挖藕机^[5]。该产品是由 2008 年华中农业大学研制的一款采藕机械。如其名,该机器以船体为框架,其中搭载了动力驱动装置、水力装置、传动装置、挖掘装置、行走装置以及操纵装置等组成。在工作时,喷嘴可以做到上下升降、左右摆动、改换角度等功能,深入水下贴近淤泥表面,往复移动,对泥土进行切割、粉碎、推移,从而使净藕挖出并浮出水面。但是该产品体型较大,比较笨重,机构复杂。4CW0-3.2 型船式挖藕机如图 1-1 所示。

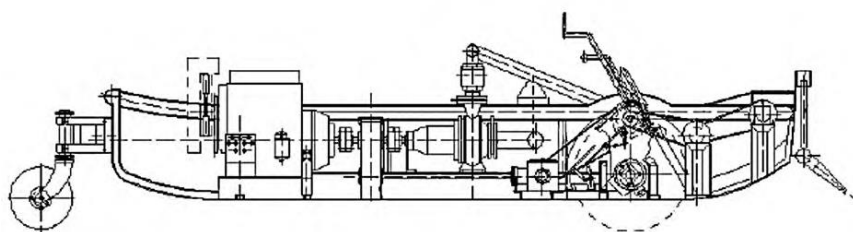


图 1-1 4CW0-3.2 型船式挖藕机

W-FPZ- 1200C 型浮桶鸭嘴式挖藕机^[6]。该产品是由 2010 年武汉兴盛农机公司研发。它主要由盘架、动力水泵室、泵机固定架、进水管、高压管、高压喷嘴构成,整体扁平似鸭嘴。该产品相对于我们的产品,它不能自动行驶工作,采集都较依赖于人工辅助,同时喷嘴还不具备旋转与升降的功能,这会导致人工操作较困难。FPZ- 1200C 型浮桶鸭嘴式挖藕机如下图 1-2 所示。



图 1-2 FPZ- 1200C 型浮桶鸭嘴式挖藕机

自走式水压莲藕掘取机^[7]，由 2001 年南通江华机械有限公司研制。该产品由田间自走式水力作业机和岸边水泵机组 2 部分组成。作业仍是高压水流冲刷莲藕，其中喷杆在液压电器控制下左右自行摆动，摆幅在 3 m 内任意调节，也可手动控制喷杆状态控制开关，控制喷杆停留在任意位置、任意高度。但是该作品不具备收集的功能，没有将采藕收集过程实现机械化，自走式水压莲藕掘取机如图 1-3 所示。



图 1-3 自走式水压莲藕掘取机

自旋射流式挖藕机^[8]。该产品由华中农业大学于 2018 年研发制作。该机器的机架为扁圆柱形，机架下设有两个中心距离为 1000mm 的喷嘴。工作时从喷嘴喷射出高压射流覆盖莲藕上方的泥土受到射流冲击破碎后被水流带走，直至莲藕完全裸露在水底，受自身浮力作用浮出水面，由人工打捞。该机器机构简单，成本较少，但也很明显不具备采收一体化和行走转向的功能，同时因喷嘴不能上下升降，难以充分洗刷莲藕。自旋射流式挖藕机如图 1-4 所示。

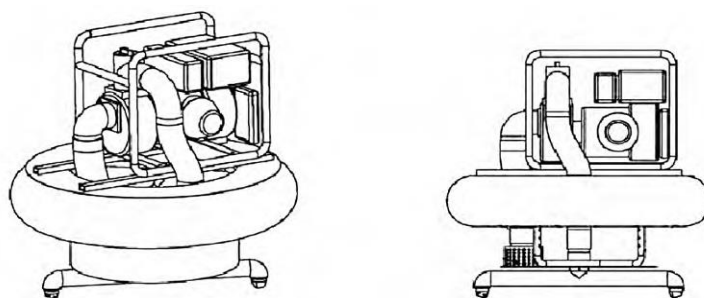


图 1-4 自旋射流式挖藕机

第二章 整体结构设计

根据莲藕生长环境，莲藕自身中空易断的结构进行分析，按照机械设备设计要求，将大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置的样机整体结构分为机架、升降装置、水射流系统、动力装置、收集装置五个部分进行设计。

2.1 设计要求

要求样机整体机身各层承重能力大于 10kg，且整体机身具有较高自由度，并能有较强的不同水深作业的适应能力，以应对不同工况下的采摘使用需求。

2.1.1 舵机的选型

要实现在同一位置大面积挖取莲藕，且转角控制较为精确有较高自由度，转动时速度较为平稳，重量较轻，选择外形体积较小的舵机作为驱动器。

在考虑力矩大小、外形尺寸、经济型等因素后，选择 DS3230-30kg 舵机作为水射流旋转喷射驱动装置，它可固定行星齿轮传动结构中主齿轮，且具备可编程、转速转角可调、体积小而转动力矩相对较大等优点，其外形结构如图 2-1 所示，舵机关键性能参数如表 2-1 所示。

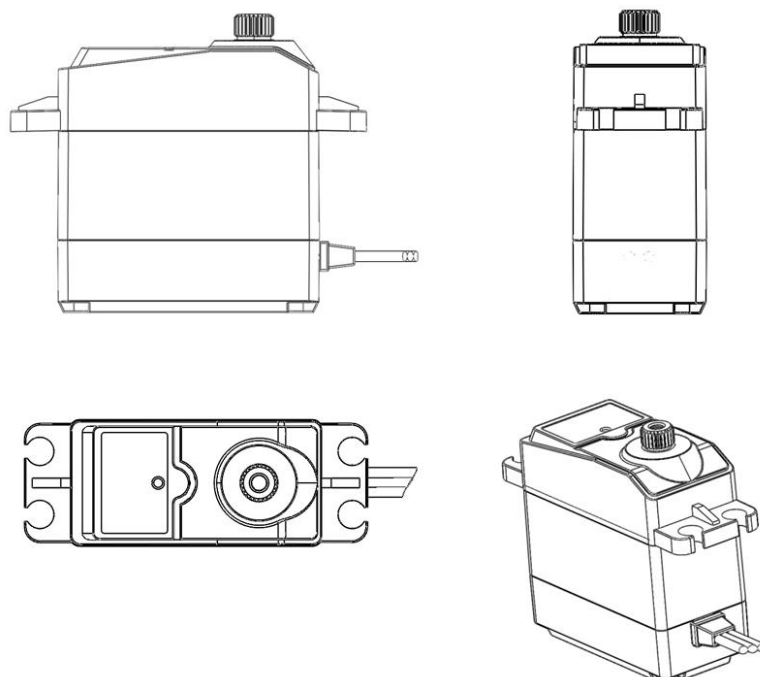


图 2-1 舵机的三维模型

表 2-1 舵机性能参数表

项目	参数
工作电压	4.8~6.5V
堵转电流	3.5A
驱动方式	PWM
脉宽范围	500~2500psec
控制精度	3usec
尺寸	40*20*40.5mm
重量	65g

2.1.2 电机的选型

1) 机身驱动电机

机身在水面移动时，靠叶轮拍打水面，产生向前的推进力，进而带动整体机身行动。为了能够实现选用电机能够带动动力部分主轴转动，从而带动动力叶轮转动。对比市面上各种电机的各个参数性能，最终选定 MG513P10_12V 型电机作为整体机身动力部分驱动电机。电机图片与相关参数如下。



图 2-2 MG513P10_12V 型电机

图 2-2 MG513P10_12V 型电机

额定电压 (V)	12
额定电压 (V)	0.36
堵转电压 (V)	3.2
减速后空载转速 (rpm)	110±132
减速后额定转速 (rpm)	850±102
额定扭矩 (kg*cm)	0.5
堵转扭矩 (kg*cm)	1.9
功率 (kg*cm)	约 4W

2) 升降装置电机

为了满足水射流系统升降的设计要求，采用了丝杆传动作为整体的上下移动的传动装置，丝杠的驱动电机选用 MC520P30 减速电机，其外形结构与相关参数如图 2-3 和表 2-3 所示。

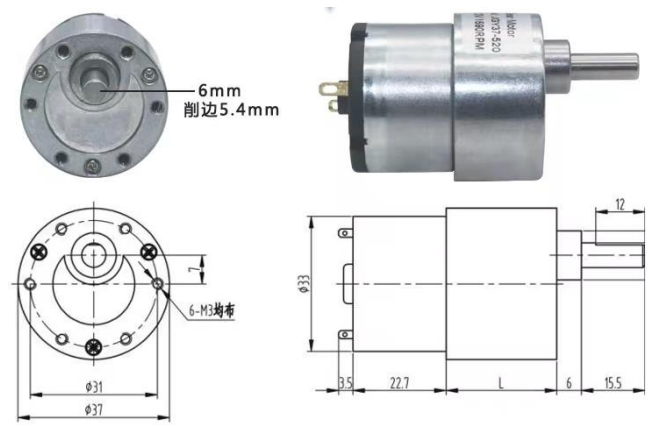


图 2-3 MC520P30 减速电机

表 2-3 MC520P30 减速电机参数

项目	参数
额定功率 (W)	4.32
额定转速 (rpm)	290±20
额定扭矩 (kg*cm)	1.5
额定电流 (A)	0.3
额定电压 (V)	12

2.1.3 水泵的选型

为了满足喷管出水口处水压 $0.1MPa \leq P \leq 0.15MPa$ 的设计要求，我们对比了市面上多款水泵，最终选定额定电压 12V，扬程 15m 的水泵作为我们的水射流

系统的抽水加压泵。水泵的图片与相关参数如图 2-4 和表 2-4 所示。



图 2-4 水泵

表 2-4 水泵参数

项目	参数
电压（V）	12
扬程（米）	15
流量（L/min）	23
功率（W）	70

2. 1. 4 莲藕结构分析

莲藕长期生活在淤泥中，莲用水面上的叶和叶柄上的气孔为地下的藕补充空气，这也造就了莲藕具有独特的中空结构。该种结构使得莲藕在不受周围淤泥束缚后可自行上浮。同时，又因其是一节节的，直接用单点力对其进行拔取易损坏其自身结构完整性，失去原有经济价值^[9]。因此我们团队选用中高速水流冲淤泥的方法，对其进行采摘。该方式既可以起到除去莲藕周围的淤泥使其自行上浮的目的，又不会破坏其结构完整性。莲藕的截面图如图 2-5 所示。



图 2-5 莲藕截面图

2.2 机架设计

大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置的机架分为上下两层结构，上层除构成该装置基本框架外，还放置了主控板、太阳能板、MC520P30 减速电机等，下层主要用来放置动力系统、收集系统中所需零部件。在样机制作中上下两层采用亚克力（聚甲基丙烯酸甲酯）板材为主体，由四根 pom（聚氧亚甲基）空心杆件组成。机架下层的形状为半圆与正方形的拼合形状，机架上层为半圆形状。整体结构外形近似一个小型的游艇，如图 2-6 所示。

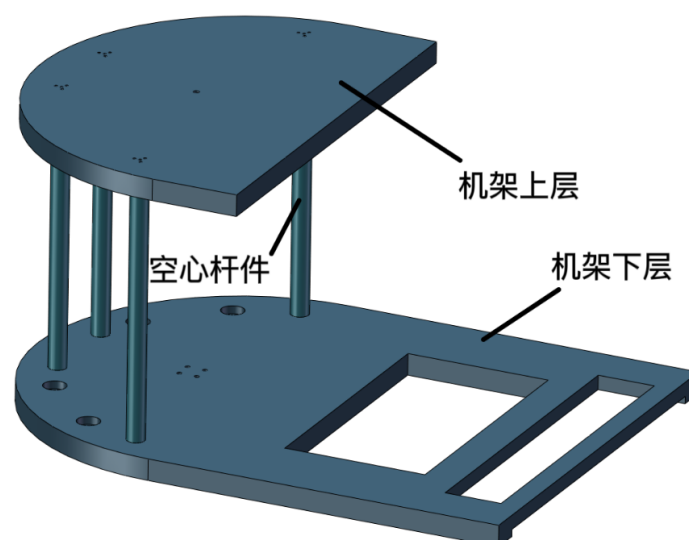


图 2-6 机架示意图

2.2.1 机架主体材料与尺寸

在样机设计汇总考虑到轻量化以及后期为搭载相关部件更容易加工，框架的两层都选用可塑性高、耐候性强的亚克力板，具体尺寸大小如下：第一层长宽分别为 800mm、600mm，厚度为 8mm，其中半圆型前部半径为 300mm，第二、三层的半径为 300mm，厚度为 5mm。图 2-7、2-8 分别为上层与下层的尺寸设计图。

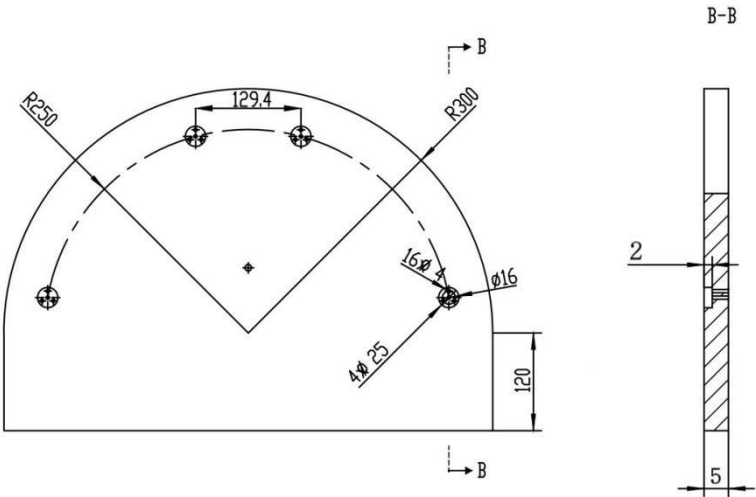


图 2-7 机架上层尺寸设计图

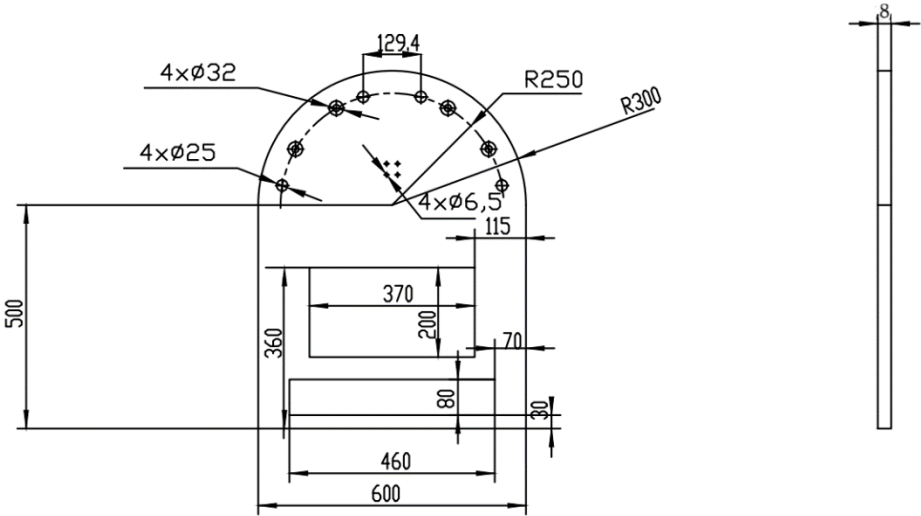


图 2-8 机架下层尺寸设计图

2.2.2 机架的连接

机架主体上下层的连接件为以 pom（聚氧亚甲基）为材料的四根空心杆件。聚氧亚甲基是一种热塑性结晶聚合物，能在大负荷和长时间循环应力下保持性能不变并有质轻、摩擦系数较小的性能，是比较适合做连接件。杆件外径为 25mm，内径为 16mm，长度一致皆为 500mm。连接杆件形状如 2-9 所示：



图 2-9 空心杆件

连接杆件先与机架上层连接，杆件上下两端装有塞栓，塞栓上打有 3 个直径为 3.5mm 的孔。图 2-10 为栓塞模型图。第三层板也分别打有内径为 3.5mm 的通孔。安有塞栓的四根杆件与机架上层用 M3.5 的自攻螺丝连接。

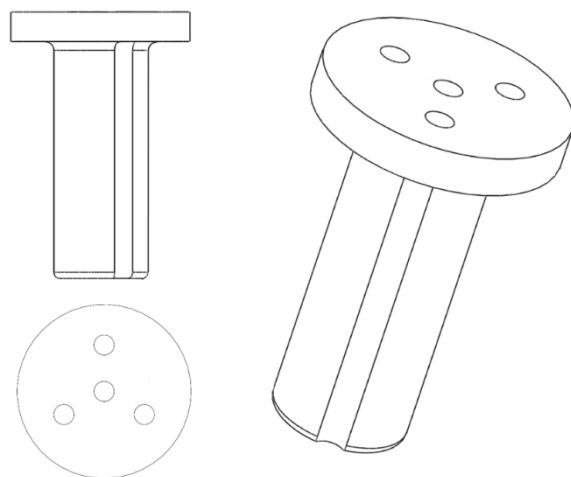


图 2-10 栓塞模型图

机架下层对应机架上层的通孔打有内径分别为 25mm 与 28mm 的通孔。机架下层通过杆件的下塞紧紧锁住杆件，构成完整的机器机架。

2.3 升降装置设计

升降装置可以在机架连接杆件上上下滑动，搭载在其上的喷管也会上下升降移动，已实现不同水深工况下的莲藕采收作业的自适应。上下运动采用丝杠机构，其结构主要由滚珠丝杆、支撑端、固定器、联轴器与螺母座组成如图 2-11 所示。

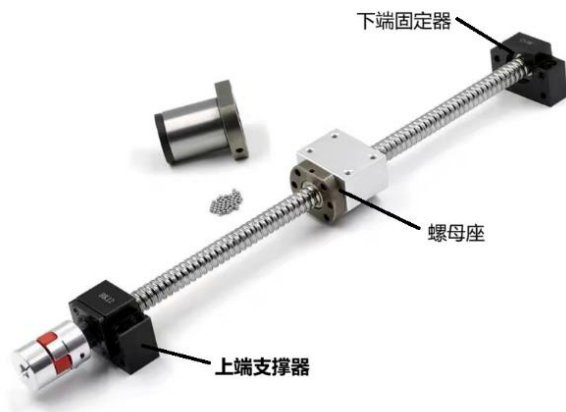


图 2-11 丝杆

上端支撑器与下端固定器分别安装在机架上层与机架下层上，升降层与螺母座固定，电机与联轴器相连并带动丝杆旋转，由此控制螺母座的上下移动，同时上下层间的空心杆作为升降装置的导向杆，增加了其上下运动的平稳性。图 2-12 为升降层三维模型图。

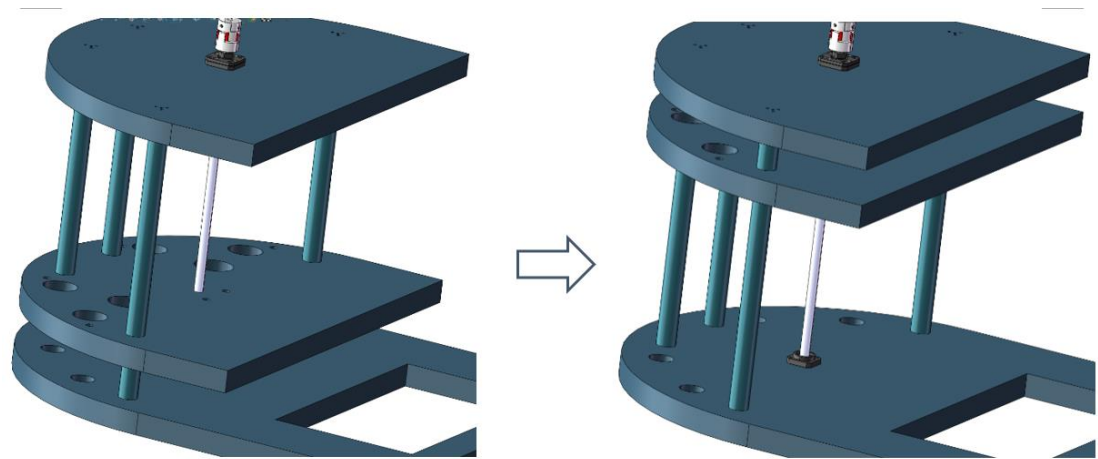


图 2-12 升降装置示意图

在考虑力矩大小、外形尺寸、经济型等因素后，选择 MC520P30 减速电机作为升降层垂直平移驱动装置，它可通过联轴器与丝杆相连，且具转速可调、体积小而转动力矩相对较大等优点。

2.4 水射流系统设计

由于莲藕中空易断的结构特点，其在去除周围淤泥对其自身的约束力外，可自行上浮这一物理现象。我们选用中高压水射流冲淤泥的方式对深埋于淤泥下的莲藕进行采集。水射流系统是该作品的重点创新部分。

2.4.1 喷管设计

喷管的结构如图 2-13 所示，由管身与喷嘴两部分，总长为 570mm，管身的内径外径分别为 9mm、15mm，喷嘴内径为 1.5mm。管身上端部分与齿轮设计成一体，齿轮的齿数与模数分别为 17 个与 2.5mm。



图 2-13 管身结构示意图

2.4.2 射流的破裂机制分析

一般来讲，水射流按照流动状态可以分为紧密段，过渡段，破碎段和水滴段。其中紧密段射流稳定性较强，运动轨迹为直线，同时边缘平整，过渡段为紧密段与破碎段的过渡区，水射流逐渐变得不稳定。进入破碎段后，射流逐步破碎为液滴。水滴段处，射流和液滴进一步破碎，变为水雾，这一段区域中液体速度极小。图 2-14 为水射流的过程阶段分析图。

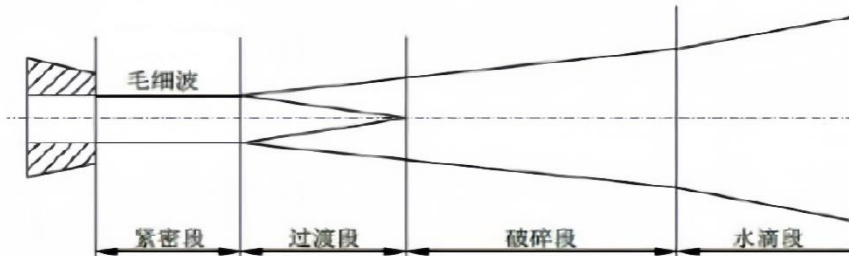


图 2-14 水射流的过程阶段分析图

基于射流的破裂机制^[1]，人们普遍认为静止水流和射流之间的相互作用会导致破裂。在线性稳定性理论中，射流可以描述为一个压力为 p_0 的基本流

$U_0 = U_0(r, \theta, z)$ 和一个压力为 p' 的小扰动 $U' = U'(r, \theta, z, t)$ 。

因此，Navier-Stokes 方程^[4]为：

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\nabla p + \frac{\nabla^2 U}{\text{Re}} \quad (2)$$

式中： $U = U_0 + \varepsilon U$ ， $p = p_0 + \varepsilon p'$ ， ∇ 为梯度因子， ∇^2 为拉普拉斯算子， Re

为雷诺数。所以我们可以得到喷流扰动方程：

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U'}{\partial t} + U_0 \cdot \nabla U' + U' \cdot \nabla U_0 + \varepsilon U' \cdot \nabla U' = -\nabla p' + \frac{\nabla^2 U'}{\text{Re}} \quad (4)$$

根据线性稳定性理论的基本假设，扰动的大小随着时间的推移而增强，当时间无限长时，有可能发生真正的扰动并导致射流破裂。针对该现象我们独特的水射流系统使得喷管可自适应升降使得与淤泥接触段水射流处于紧密段与过渡段之间。

2.4.3 喷嘴参数计算

描述射流喷嘴特征的基本参数主要有流体压力、功率、流速、流量、反冲力等动力学参数^[2]对于连续射流模型，在射流喷嘴入口和出口处两点利用伯努利方程和连续性方程，假设壁面光滑，忽略沿程阻力及高度差，可得出如下关系式：

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} \quad (5)$$

$$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2 \quad (6)$$

式中： p_1 、 p_2 分别为喷嘴入口和出口处的静压力， V_1 、 V_2 分别为喷嘴入口和出口处的平均流速。

由于喷嘴为圆柱形结构，则有 $A = \frac{\pi}{4} d^2$ ，并假设 $\rho_1 = \rho_2$ ，则由式（5）和式（6）可得

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho[1 - (\frac{d_2}{d_1})^4]}} \quad (7)$$

由于中高压射流过程中， $p_1 \gg p_2$ ， $\frac{d_2}{d_1} \ll 1$ ，同时将 $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ 代入式

（5）~（7），最后得出水射流流速简化表达式：

$$V_1 = 44.72 \sqrt{P} \quad (8)$$

$$q_1 = V_1 \cdot A = 2.1 d^2 \sqrt{p} \quad (9)$$

式中： V_1 为水射流流速， m/s ； p 为喷嘴嘴口压力， MPa ； q_1 为水射流流量， L/min ； d 为喷嘴嘴口直径， mm 。

由式（8）和式（9）得出的是理论流量和流速，通过喷嘴的实际流速 v 和流量 q 要比该值小。

当射流流量和喷嘴入口压力确定后，就可以计算喷嘴的射流功率：

$$P=16.67pq$$

(10)

将式（10）代入整理得

$$P=35.1d^2p^{\frac{3}{2}}$$

(11)

式中， P 为水射流功率， W 。

2.4.4 喷嘴结构优化

根据收缩段形式得不同，目前市面上常见的喷嘴有锥直型喷嘴、圆弧型喷嘴、抛物线型喷嘴三种类型^[3]。图 2-15 为三种喷嘴截面图。

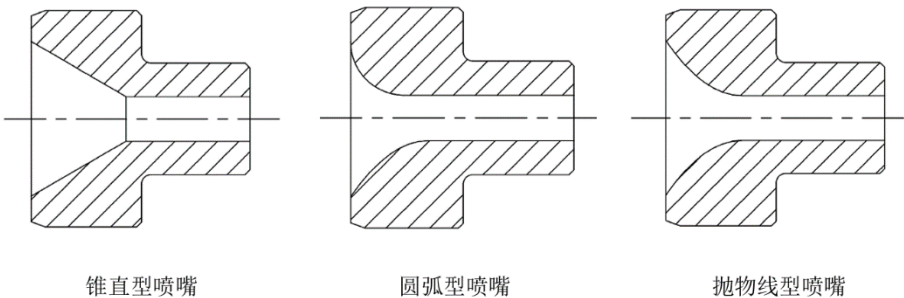


图 2-15 三种喷嘴截面图

对三种喷嘴分别建立物理模型，通过仿真软件采用离散相模型对三种喷嘴进行冲蚀分析。对模型进行设定，计算环境为稳态。计算域类型为流体域，即流体域为液态的流体，流体属性为连续流体。参考压力为 0.101MPa。之后采用 DPM 模型，对模型进行求解。其中对流项的离散格式采用高阶离散格式，湍流方程的离散格式采用一阶迎风格式。收敛平均残差目标为 1.0×10^{-4} 。得到不同喷嘴的性能数据，如表 2-5 喷头性能表。

表 2-5 喷头性能表

喷嘴类型	流体最大速度/（ m/s ）	冲蚀率/ $[kg/(m^2\cdot s)]$
锥直型	188	6.64×10^{-1}
圆弧形	181	1.27×10^{-5}
抛物线型	182	4.77×10^{-6}

通过该仿真过程，我们最终选定锥直型喷嘴作为水射流系统的喷嘴。

同时，我们对不同喷嘴口径做仿真过程，最终选定 1.5mm 口径。

2.4.5 喷管位置设计

市面上的大多挖藕机械的喷管是安放在一条直线上，作业时水流冲击范围为喷嘴前方的矩形局域，作业位置较为局限。我们改用成半圆弧线的喷管布置方案，安装时齿轮位于第二层便于与传动装置连接实现角度调整，喷管穿过第一层的后伸入水下，由水泵抽取潭水，水流通过软管与分水器进入喷管，喷射的水流冲击

区域为扇形区域，能冲刷机器两侧更宽广的莲藕区域，同时喷管角度可调，能更精准的对准莲藕，实现同位置大角度的精准冲刷的莲藕采摘作业，其设计结构如图 2-16 所示。

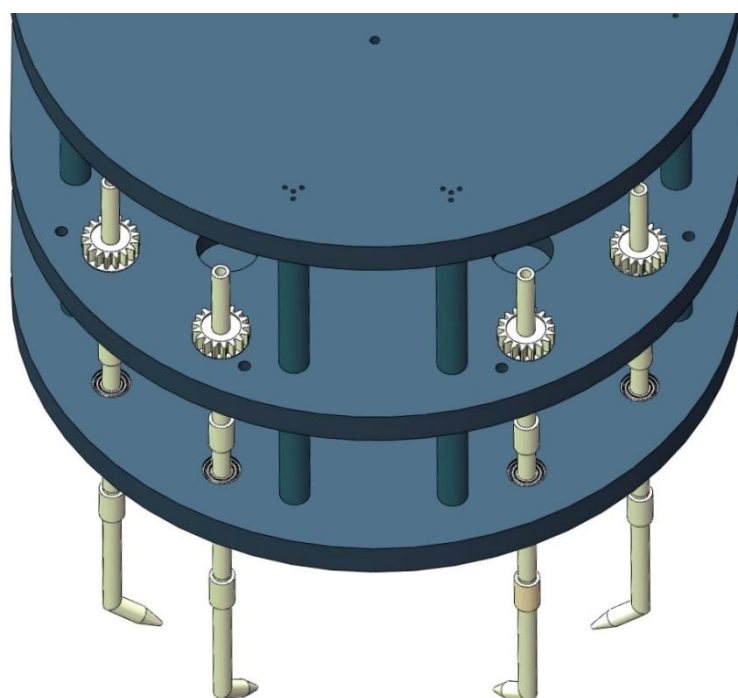


图 2-16 喷管位置示意图

2. 4. 6 喷管自转动与随升降层垂直偏移运动设计

因为不同的淤泥性质会导致莲藕被束缚的程度不同与处于泥下的深度不同，为实现能够对莲藕进行反复冲刷并提升对水深的适应性，该机器对水射流系统搭载了旋转机构与升降移动机构。

1) 自旋转机构

该机构主要采用了两组行星齿轮传动机构，该两组行星齿轮传动机构对称安放在升降层上。在这个行星齿轮机构中，部件主要是一个齿数为 49 与模数为 2.5mm 的主动轮与携带从动齿轮的喷管。主动齿轮与喷管从动齿轮按照机械设计齿轮啮合标准啮合，选用 DS3230-30kg 型号的舵机带动主轴按限定角度旋转，主动轴与主动齿轮之间通过键连接，从而使得主动齿轮随主动轴转动而转动，同时主动齿轮带动喷管上从动齿轮旋转，进而使得喷嘴随之一同转动。该行星齿轮机构的主要部件由 PLA 材料 3D 打印而成，PLA 材料是一种由天然植物淀粉经过酸解聚合而成的生物塑料。相比传统塑料，PLA 材料更加环保，可降解，对环境污染量更小。PLA 材料具有良好的加工性、熔融性和流动性，易于 3D 打印。同时 PLA 材料在打印时也可以调节它的打印参数以及打印温度，提高 PLA 材料的粘附性、稳定性和打印成功率。行星齿轮传动机构以及安放位置如图 2-17 所示。

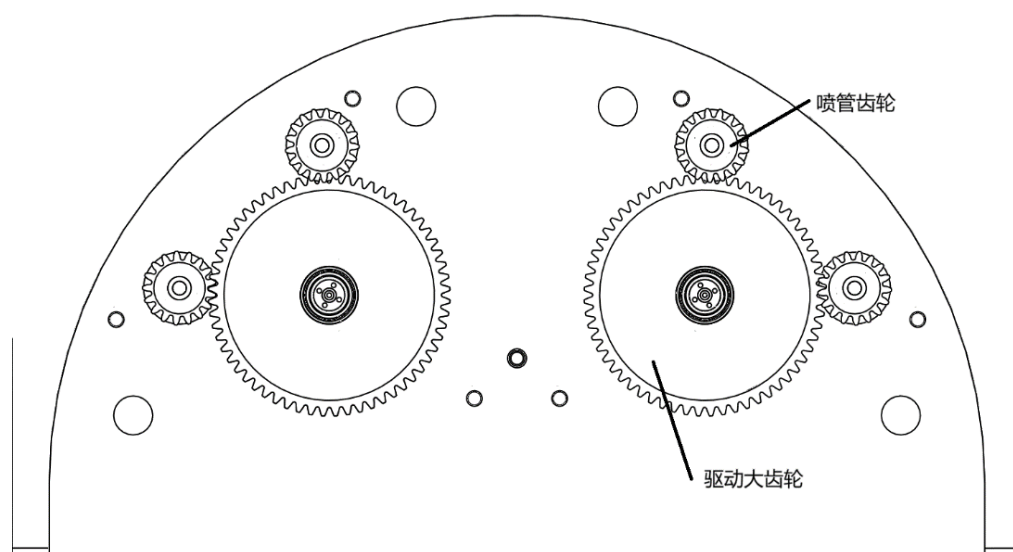


图 2-17 行星齿轮传动机构

考虑到机器作业时会发生晃动，为防止齿轮发生上下移动，特设计了厚度为 5mm 的限位板，限位板通过 M10 的螺丝与第二层固定。形状示意如下图 2-18。

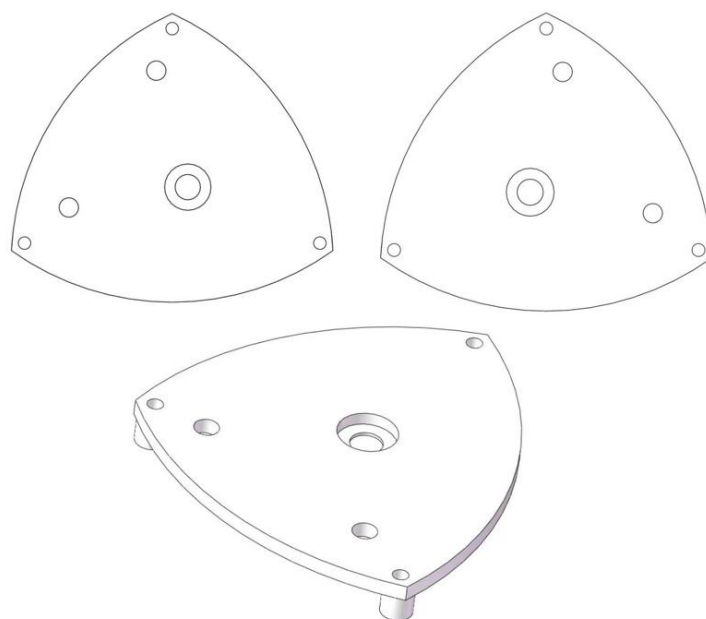


图 2-18 限位板

2) 喷管垂直移动系统

莲藕一般深埋在淤泥的 30cm 左右处，要保证喷管与淤泥的距离足够近，才能充分冲刷掉莲藕上的淤泥并使之上浮。针对这一特性，我们设计了丝杆传动机构，通过丝杆中上下端固定器分别固定在机架上下层。丝杆螺母座顶端与升降层

底部通过螺栓进行连接。通过 MC520P30 减速电机驱动丝杆转动，从而带动丝杆中部螺母座上下垂直移动，进而带动整个升降层垂直移动，最终实现喷管可自适应水深，调节自身高度的效果。由于升降层所搭载的部件的高度，所以其上下升降距离有限。图 2-19 为升降层部分零部件实物图。

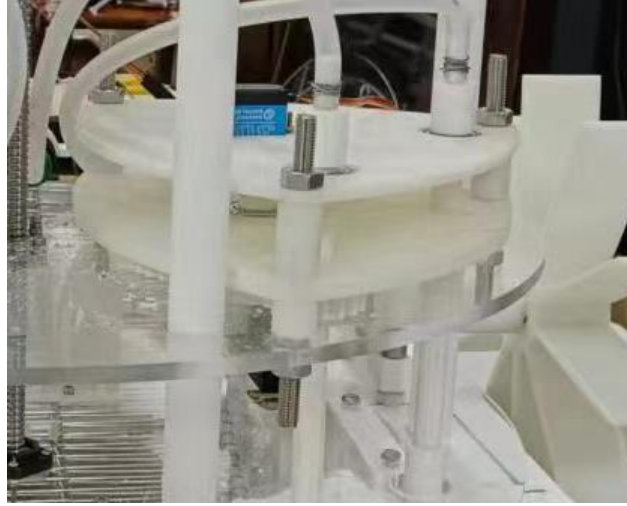


图 2-19 升降层部分零部件实物图

经实物测量知第二层上部搭载的部件高度为 150mm，又考虑到泡沫浮板的厚度为 150mm 与亚克力板得厚度 8mm。设喷管在水下的最短长度为 X_1 ；在水下的最长长度为 X_2 。

$$X_1 = L_1 - (L_2 - L_3) - L_4 + L_5 \quad (12)$$

$$X_2 = L_1 - L_3 - L_4 - L_6 + L_5 \quad (13)$$

其中 L_1 为喷管的总长 540mm； L_2 为丝杆总长 450mm； L_3 为第二层上部搭载的部件高度 150mm； L_4 为亚克力板与泡沫厚度之和 158mm； L_5 吃水深度 58mm； L_6 是第二层固定螺栓的外延长度 50mm，则可求得 X_1, X_2 ：

$$X_1 = 540 - (450 - 150) - 158 + 58mm = 140mm \quad (14)$$

$$X_2 = 540 - 150 - 50 - 158 + 58mm = 240mm \quad (15)$$

可以知喷管水下距离最大为 140mm，最小为 240mm。可见喷管的上下升降距离较大，能较好地适应不同的水深环境。

通过相关公式计算，得出 MC520P30 减速电机可用于驱动该设备中丝杆转动，具体计算过程如下：

根据丝杆升力公式^[10]：

$$F = \frac{2\pi nT}{P} \quad (16)$$

其中 T 为驱动扭矩, n 为进给效率, P 为丝杆导程, 滚珠丝杆的效率一般为 $0.9 \sim 0.95$, 我们取用 0.9 。 $T=150N/mm$, $P=4mm$, π 取 3.14 。则

$$F = \frac{2 \times 3.14 \times 0.9 \times 150}{4} N = 211.95N \quad (17)$$

该机器总体重量为 $20kg$ 左右, 显然升降层与其上的水射流系统能轻松进行上下升降运动。

2.5 整体机身动力行走系统设计

2.5.1 浮板部分

采藕过程中相当重要的一步就是保证莲藕的完整性, 受损的莲藕在市场上几乎没有竞争价值, 所以为避免机器入水部分破伤莲藕, 我们团队采用了泡沫作为机器的浮板。采藕机由泡沫浮板来提供足够的浮力, 为保证泡沫浮板不易损坏以及能够承载住整台机器, 泡沫板选用了硬质高密度的 EPE (发泡聚乙烯) 泡沫板。聚乙烯泡沫塑料是以聚乙烯树脂为主体, 加入发泡剂、交联剂和其它添加剂制成, 具备密度小; 吸水性小; 化学性能稳定, 不易受腐蚀; 机械性能好, 坚韧、有挠性、耐摩擦; 加工性能好, 易于成型; 价格较便宜等优点。

EPE 泡沫浮板粘附在采藕机框架的第一层之下, 粘附选用了 EVA 海绵胶水, 适用于 EPE 泡沫且能提供强力的黏性。整台机器质量为 $20kg$, 泡沫浮板平均厚度为 $200mm$, 具体分布如下图, 所用泡沫板的总体积约为 $0.05112m^3$

浮力与吃水深度相关计算如下:

假设潭水的密度为 $\rho = 1 \times 10^3 kg/m^3$

$$F = mg \quad (18)$$

其中 m 为整台机器的质量, g 为重力加速度, 则可求得:

$$F = 20kg \times 9.8N/kg = 196N \quad (19)$$

根据阿基米德原理中浮力计算公式:

$$F = \rho vg \quad (20)$$

其中 V 为入水体积, 则可得:

$$V = \frac{F}{\rho g} = \frac{20kg}{1 \times 10^3 kg/m^3} = 0.02m^3 \quad (21)$$

由吃水深度计算公式^[11]

$$L = \frac{V}{V_{总}} \times 0.15m \quad (22)$$

其中 $V_{总}$ 为泡沫板总体积, L 为吃水深度, 可得, $L=0.05587m$, 即 $58mm$ 。以上数

据可为后期相关尺寸设计提供参考。

2.5.2 驱动部分

该整台机器采用叶轮驱动,具备有效地参与作业速度的调整和提高水上作业的机动性的优势。一对叶轮设在采藕机的两侧,固定的两个 MG513P10_12V 型电机带转动轴转动,为减少叶轮转轴的摩擦力,转轴穿过安有 304 不锈钢滚珠轴承固定器进行连接,转轴又通过联轴器与电机相连,实现动力的传递。叶轮与转动轴用销连接,随即带动叶轮旋转。叶轮旋转,拍打水面,对整体机身产生向前的推力。在一对叶轮同速率旋转时,机器直线前行与直线退后;叶轮差速旋转时,机器便可以旋转。叶轮如图 2-20 所示。



图 2-20 叶轮

2.6 收集系统设计

2.6.1 传送机构设计

为完成对莲藕的收集作业,我们团队选用了履带作为传送部件,同时为减少机器的阻力,我们为该机器的履带选用了不锈钢链条履带,通过驱动此履带运送上浮的莲藕,履带结构如图 2-21 所示

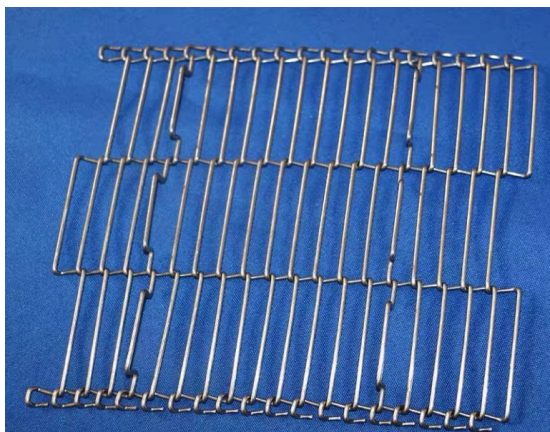


图 2-21 履带

机架下层打空出一个长 320mm，宽 200mm 的矩形区域，履带穿过这个区域并与第一层成一定倾角倾斜放置，履带两端放入带有齿轮的轮轴，入水的轮轴用长轴固定，另一端轮轴用轴承座。具体安装示意如图。

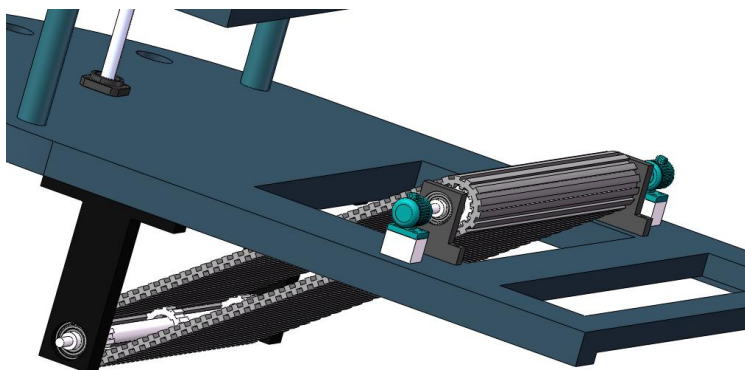


图 2-22 履带安装示意图

同时为防止莲藕从履带上滑落，特设计可安装至履带的抓钩增大俘获莲藕的概率，该抓钩由不锈钢加工而成。履带中的铁链直径为 2mm，为使抓钩能固定在履带上，特设计成如下图 2-23 所示

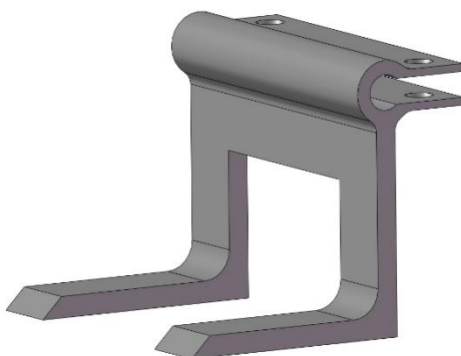


图 2-23 抓钩

其设计能卡住铁链从而固定，同时抓钩进行圆角处理，更不易折坏。整体的传送结构如图 2-24 所示。

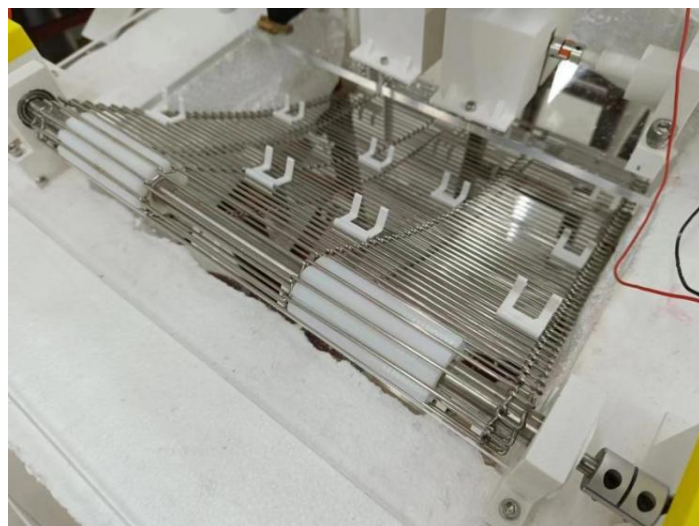


图 2-24 传送结构示意图

2.6.2 收集篮设计

首先在机架下层上履带的后方加工打空出一个长 460mm, 宽为 80mm 的矩形, 后将 304 不锈钢纱网的四周用螺钉固定在板上, 便形成了一网篮, 由此构成收集篮。当上浮至水面的莲藕被履带带上来后, 便能落进在收集篮中。

2.6.3 履带结构合理性验证

现我国种植面积最多最广的莲藕是鄂莲五号(3537), 以成熟的鄂莲五号为例, 它的直径一般在 60mm 左右, 为避免上浮的莲藕堵塞在第一层框架亚克力板与履带之间, 则要保证第一层亚克力板口离履带的距离放得下莲藕。以下为测量实物得到的数据与简约画图。

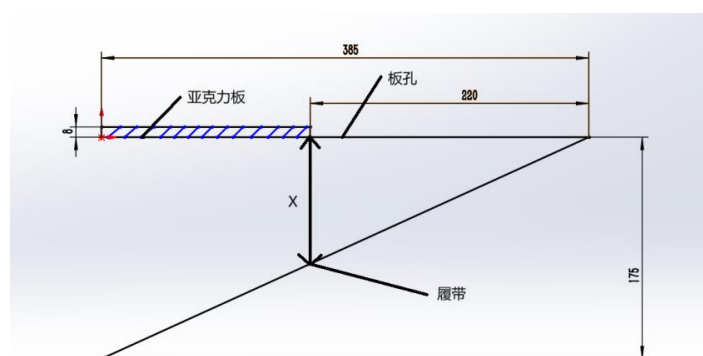


图 2-25 实物简图

根据三角形相似原理：

$$\frac{X}{220} = \frac{175}{386} \quad (23)$$

可以得到 $X = 100\text{mm} > 60\text{mm}$, 因为第一层亚克力板口离履带的距离大于莲藕的直径, 则将莲藕带上时不会发生被堵塞的现象, 此设计是合理的。

2.7 机身外形设计

大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置由机架、动力系统、水射流系统、收集系统组成，产品模型的整体渲染图如图 3-4。机架具有一定的负载能力，负责承载其他机械、构件部分、控制系统以及电源部分，并且可负载一定重量的采集的莲藕；动力系统由双桨叶构成，通过电机旋转带动桨叶，完成采藕机在水面上前进、后退、转弯等运动；收集系统由带有抓钩的链条履带以及收集篮构成。产品模型的爆炸图如图 3-2 所示。

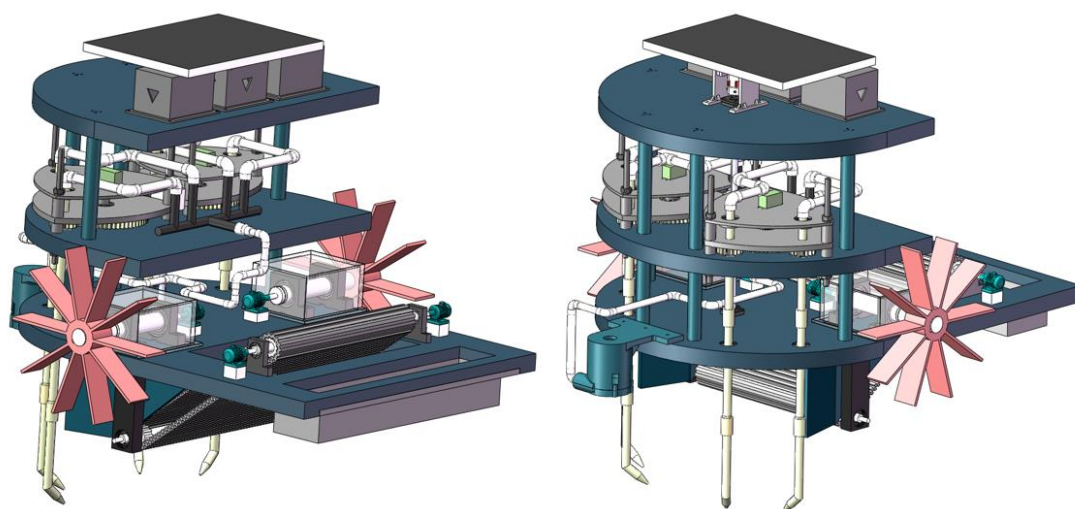


图 2-26 整体渲染图

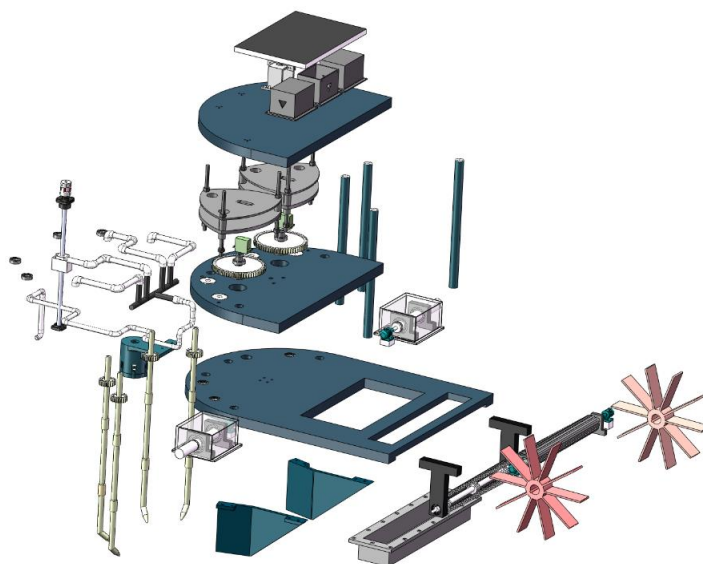


图 2-27 整体爆炸图

第三章 控制系统设计

在硬件上，我们设计了一款 12V 和 5V 稳压电源控制板，可供后续更换大容量电池，提高续航能力做准备。同时在硬件选择上，团队选用集成度较高的控制板，有效节省面积占用，并为各个硬件设备设计有防水隔离仓。

3.1 硬件控制原理

硬件控制部分采用 OpenRF4 控制板，控制板以高性能 STM32F407VET6 作为主控芯片，同时板载 7.2V，5V，3V 稳压电源。控制板提供了 4 路编码器电机接口，6 路 PWM 舵机接口，以及 USB/SBUS/CAN/I2C/TTL/蓝牙/传感器等外设接口、资源丰富。

作品具有 2 个叶轮、1 个履带传输、2 个喷水舵机、1 个平台升降装置。理论上讲需要 3 个编码器电机、2 个大力矩舵机、1 个直流电机。而 OpenRF4 控制板资源远远满足需求。

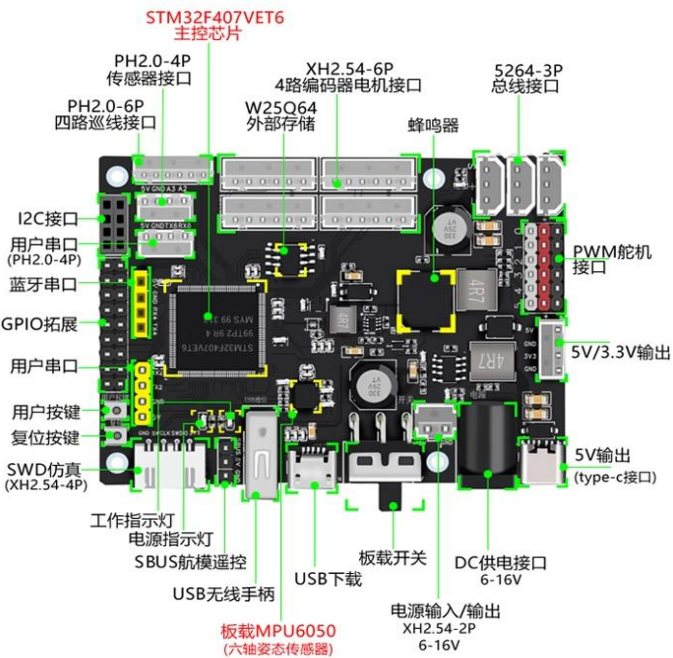


图 3-1 主控板资源图

3.2 硬件系统设计

硬件系统的设计与电子器件的选型基于产品功能的要求，驱动机械结构完成一系列功能，主要分为五大模块：控制模块、驱动模块、电源模块、通信模块、感知模块。各模块包含的功能如图 3-2 所示：

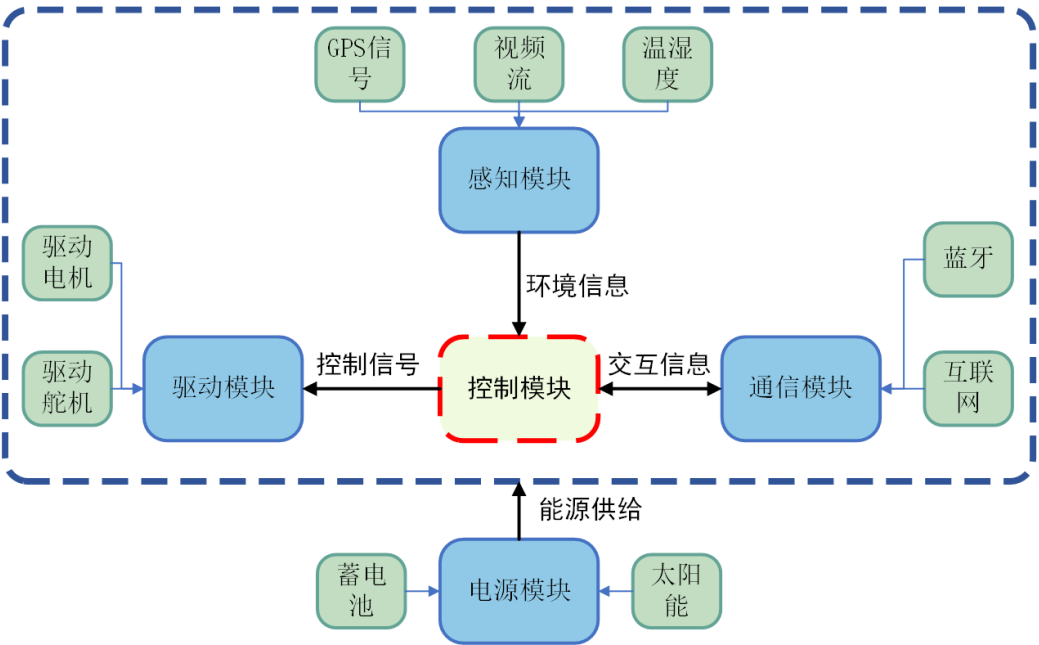


图 3-2 硬件系统组成框架

电源模块通过蓄电池以及安装在上层顶部的太阳能板为电子系统整体进行供电。

驱动模块与控制模块进行通信，根据收到的控制信号驱动电机、舵机以及水泵，使采藕机完成运动、平台升降、喷灌管射流与旋转、收集莲藕等操作。

感知模块基于 GPS 模块、温湿度感传感器、摄像头三大器件完成对环境信息的采集，并发送给控制模块。

通信模块分蓝牙通信与互联网通信两种模式。利用蓝牙协议与操控器完成通信，近距离下操作人员利用操控器完成对采藕机的控制。通信模块可利用 5G 模块接入互联网，操作人员可通过 Web 门户网站访问操作台，远程操作机器。同时工作时产生的如工作时长、工作路线、环境信息等日志信息，将通过通信模块上传至软件系统后端。

控制模块是整个硬件系统的核心，基于从通信模块获取到的指令发送信号给驱动模块。控制模块共控制包括四个直流电机、2 个舵机、1 个水泵在内的 7 个器件，可完成包括前进、后退、左转、右转、汲水、喷灌管调整角度、喷灌管升降等操作在内的共 11 个操作。控制系统通过控制驱动左桨、右桨的两个电机不同的转速实现采藕机的差速转动。

3.3 软件系统设计

软件系统的设计需要配合硬件系统，完成与硬件部分的通信与交互，可实现的功能如图 3-3 所示。

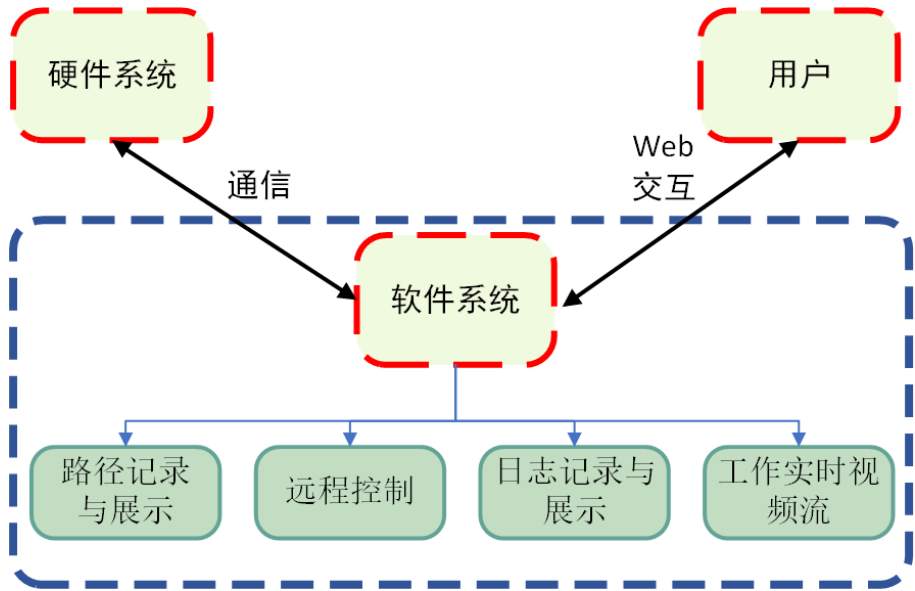


图 3-3 软件系统组成框架

软件系统通过 Web 门户与用户进行交互，将采藕机工作时的信息展示给用户。硬件系统将日志与环境信息发送给软件系统，软件系统将用户在 Web 端下达的指令发送给硬件系统。

硬件系统采集的 GPS 信息发送给软件系统后，通过调用百度地图、高德地图的 API 接口，将采藕机工作时的路线信息展示在 Web 端。

软件系统响应用户在 Web 端下达的控制指令，并将指令打包成数据包下发给硬件系统，硬件系统对数据包进行解析后执行相应的操作，控制采藕机的前进、后退、转向等操作。

同时对于硬件系统工作时记录的数据，如工作时长、工作路线、温湿度、剩余电量等数据，会被软件系统后端记录入数据库，并在 Web 端以表格或者图表的形式直观地展示出来。

采藕机上安装的摄像头会将正前方的实时视野信息发送至软件系统后端，软件系统对完成解析后会在 Web 端进行实时展示，以便于用户查看采藕机的工作环境并下发控制指令。

第四章 样机的集成与实验测试

4.1 样机集成

以下是样机中外购的部分零件



图 4-1 丝杆实物图



图 4-2 履带实物图



图 4-3 分水器实物图

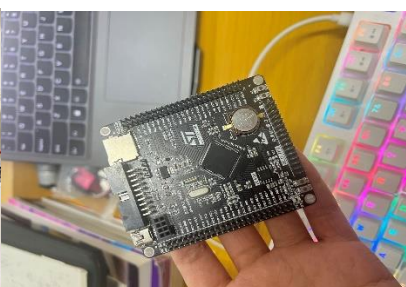


图 4-4 主控板实物图

以下是样机中通过 3D 打印的部分零件



图 4-5 3D 打印的主动齿轮



图 4-6 3D 打印的喷嘴

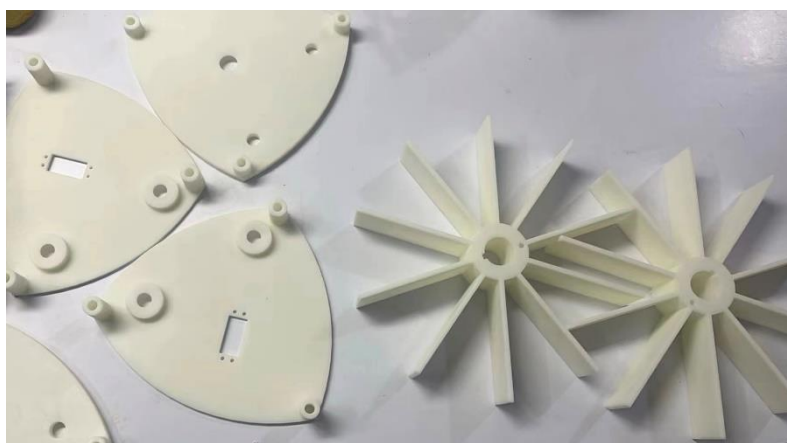


图 4-6 3D 打印的桨叶与限位板

以下是样机的实物图



图 4-7 样机的正视图

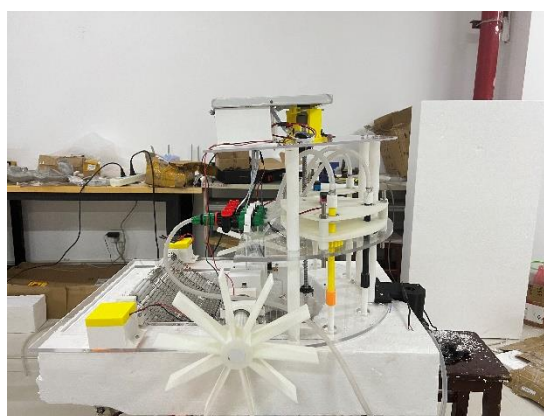


图 4-8 样机的侧视图

以下是我们的组装过程图

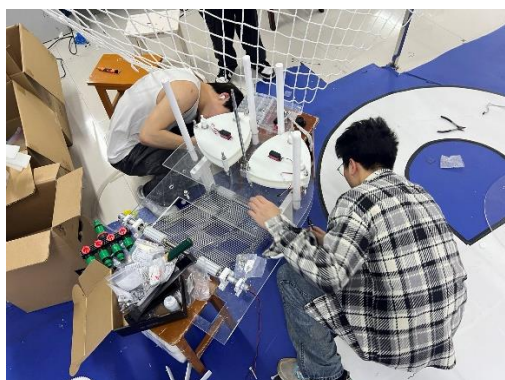


图 4-9 机架组装图



图 4-10 焊线过程图

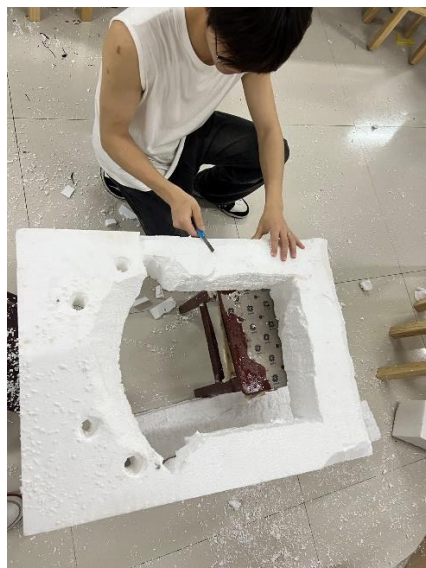


图 4-11 泡沫切割过程图

以下是室外与室内样机模拟仿真采集莲藕的图



图 4-12 室外模拟

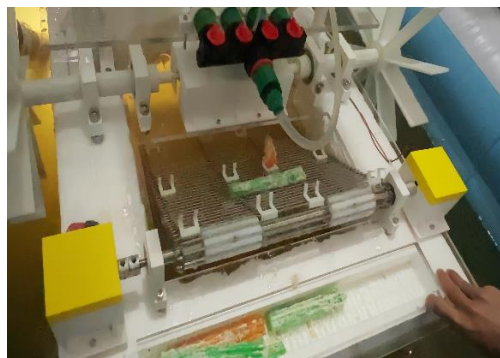


图 4-13 室内模拟成功收集模拟莲藕

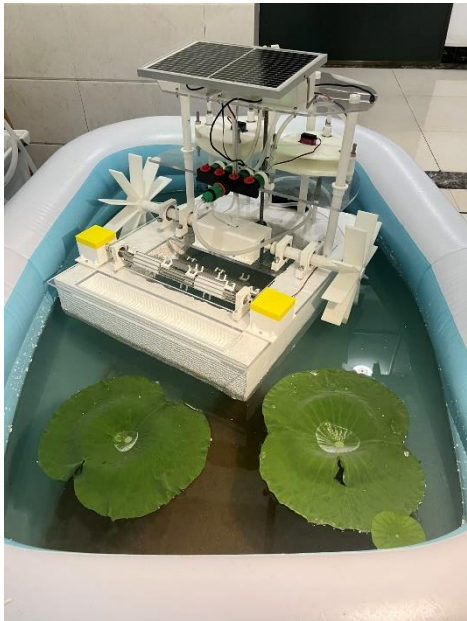


图 4-14 室内模拟



图 4-15 收集篓

4.2 工作原理

该采藕机器的具体工作流程：

第一步，检查机器状况，无误后机器下水并摆放好位置；

第二步，通过遥控根据水深上下调节好喷管与淤泥的距离；

第三步，控制机器通过旋转叶轮开始行走，同时机器前的抽水泵抽取藕田中的水，并运输到机器前端的喷射管，从而喷射出强劲的冲击水流冲刷莲藕。在这个过程中喷管会进行旋转，反复冲刷泥中的莲藕，使莲藕脱离淤泥的控制进而上浮；

第四步，上浮的莲藕在机器的前进方向上，被运输履带收集到莲藕收集篮中，由此完成一次整体的作业；

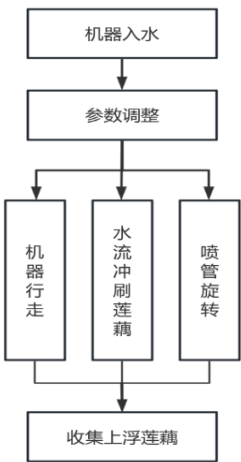


图 4-16 工作流程图

4.3 实验测试

1、莲藕地模拟

由于各方面条件的限制，我们的产品难以在真实的莲藕地里进行实验，为尽力模仿莲藕地的水下状况，我们用注有 50mm 深的水的小型游泳池模拟池塘，在小型游泳池中放入泥沙来模拟束缚莲藕的淤泥，共同形成模拟的莲藕地。小型游泳池如图 4-1 所示，泥沙如图 4-2 所示



图 4-17 小型游泳池



图 4-18 泥沙

2、莲藕的模拟

莲藕外形似圆柱，内部具备多孔中空的特性，能够漂浮在水面上。我们团队为模仿这一特性，采用将数十只吸管捆绑成圆柱状来模拟莲藕，此模拟莲藕在无束缚的状况下可以在水中上浮。模拟莲藕如图 4-3 所示



图 4-19 模拟莲藕

3、产品实验

我们先将 3 个模拟莲藕埋入到小池塘的泥沙，约有 15mm 深。后按照该采藕机械的的工作流程进行操作，入水并调试喷管升降、旋转的数据，使喷管接近于淤泥，充分发挥采藕性能。实验遵守重复原则，重复 3 次进行，在实验中记录模拟莲藕被冲刷至水面上所用的时间。相关实验记录如表 4-1 所示。

表 4-1 实验记录

实验序号	所用时间（秒）
1	20
2	25
3	32

第五章 创新点与推广应用价值

5.1 作品创新点

1、射流系统具备更强的适应性与可控性

在环境适应性方面，为能根据水深等环境因素进行调整，充分发挥高压水流的冲击力，保证高压水流与淤泥保持较近的距离与扩大水流的冲刷范围，该作品能够调控喷管进行上下升降移动，从而达到有效冲刷莲藕的效果，同时还能 360° 旋转或自定义旋转角度范围反复冲刷莲藕。在可控性方面，该作品具备远程遥控功能，不仅能够在作业前调试好设备，还能在作业时进行实时操控，调整步进速率、喷管位置和喷管旋转等参数，具备很强的操控性，更能满足莲藕养殖户的多种需求。

2、结构简单，机动性强

我们团队的采藕机械在机构的设置上秉承着简约化与低成本化，本机器中主要运用到了丝杆传动机构、行星齿轮机构等简单的机构，这使得我们作品重量与体积相较于市面上的众多采藕机械缩减了很多，因此机器能够在一定面积的莲藕潭中运动更加自如，机动性得以提升，保证了作业效率，并对突发情况更能及时的进行调整。同时，轻巧的机器对于搬运转移和减少莲藕与机器的碰伤上都有利处。

3、远程遥控，操控自如

以往的采藕机械对于喷管的入水深度、摆动速度等相关参数都需要再工作前及时调整好，而我们的机器则能够远程遥控，对于行走速度、行走方向、喷管的升降和喷管旋转速度等参数都能做到及时的调整并快速适应变化的环境，达到操控自如。

4、绿色发展，清洁能源

为响应国家《“十四五”全国农业机械化发展规划》中提出的推动农机节能减排与加快农业绿色化的政策，我们团队为该采藕机械搭载了太阳能设备，太阳能将被转化为电能并供给给行走系统与水射流系统，进一步缓解该机器对能量的需求。

5.2 推广应用价值

本产品应用与成熟莲藕的采收工作，主要是解决采藕成本高、效率低、劳动强度大的问题，能将采集莲藕这一繁重的过程机械化与自动化，进一步推动农机装备的发展。该产品所具备的更加完备的水射流系统与远程操控功能将使得其有更大的推广应用价值。面对莲藕经济价值巨大、国

家推动农机机械化自动化的政策与莲藕采挖成本高效率低的现状，这类挖藕机械有广阔的利用空间，针对市面产品中的机械结构复杂、笨重不灵活、功能不全面等问题，我们的作品所展示出的优势与特点将更加能适应莲藕机械的发展需要。综上，从经济发展价值与市场竞争上来看，我们团队的作品都有很强的推广应用价值。

5.3 产品对比

如本设计书中“当前国内外研究现状”一节所说一样，市面上比较流行与经典的采藕机械主要有四款，分别为 4CWO-3.2 型船式挖藕机、W-FPZ- 1200C 型浮桶鸭嘴式挖藕机、自走式水压莲藕掘取机和自旋射流式挖藕机。我们团队前期充分学习这四种机器，并加以改善与补充，以下，将这些机器与我们的作品——大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置，进行对比。

表 4-2 市场调研

机器名称	该产品的优势与特色	该作品的不足
4CWO-3.2 型船式挖藕机	机构精密，运动精度高；喷嘴可在竖直、水平方向上移动；机器工作稳定	机器体积较大，重量较重，活动不够灵活；不具备收集装备，需要人工收集莲藕；
W-FPZ-1200C 型浮桶鸭嘴式挖藕机	体型较小，易搬运转移；安有多种入水深度不同的喷嘴，能够适应不同的水深环境	不具备控制功能，操作较难；喷管不能水平移动，达不到反复冲刷与扩大作用范围的目的；
自走式水压莲藕掘取机	可控性很强，如喷嘴位置、喷杆摆动速度和步进距离等参数可自由调控；安有行走轮，方便搬运	不具备收集装备，需要人工收集莲藕；功作参数不能远程调控
自旋射流式挖藕机	机器行走时，喷嘴能依靠高压水流反作用力旋转，能够大范围的、反复的冲刷莲藕	不具备收集装备，需要人工收集莲藕；喷管不能上下移动，难以适应不同的水深环境。
大角度冲刷式采收一体莲藕收获装置	结构简单，体型较小，能达到灵活运动,便于操控的效果；喷管可以升降与旋转移动，不仅能在大范围反复冲刷莲藕，还更好适应不同深浅的水下环境；	相关连接部位较简单，不够稳定

	可控性强自动化高，行走速度、喷管上下位置等参数都能远程遥控；安有太阳能系统，能够节约能源；	
--	---	--

参考文献

- [1]邵涛,潘本伦,李健,等.嵌入式喷嘴环热芯盒工艺研究应用[C]//重庆铸造行业协会,重庆市机械工程学会铸造分会.2024重庆市铸造年会论文集.重庆江增船舶重工有限公司;,2024:3.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.003211.
- [2]王世强,王星,刘景超,等.水力喷砂射孔喷嘴研究[J].机械工程师,2024,(04):128-131.
- [3]秦汉时,方凯跃,高洪辉,等.基于正交试验的蒸汽喷射器喷嘴结构优化[J/OL].真空科学与技术学报,1-7[2024-04-28].<https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjvst.202309009>.
- [4]张强,王文强,车阳,等.柔性钻具水力导向射流喷嘴流场分析[J].石油矿场机械,2024,53(02):26-33
- [5]王向军,张孟玉,姚光伟,等.水稻秸秆炭对土壤性质和莲藕植株生长的影响[J].浙江科技学院学报,2023,35(05):448-456.
- [6]郭洋民.水田莲藕采挖机设计与研究[D].华中农业大学,2015.
- [7]刘莫尘,梁文倩,肖化超,等.履带式自走水力采藕机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(S2):61-7
- [8]安文斌,亚森江·白克力,宋玲,等.新疆莲藕旱田采收机的设计[J].新疆农机化,2022,(06):18-21+28.DOI:10.13620/j.cnki.issn1007-7782.2022.06.005.
- [9]肖化超.履带自走式高效低损伤水力采藕机的研制[D].山东农业大学,2021.DOI:10.27277/d.cnki.gsdnu.2021.000896.
- [10]高雪峰,洪占勇,姚友丹.大功率莲藕采收机的研制[J].农机化研究,2021,43(02):94-98.DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2021.02.016.
- [11]陈强,钱孟波,虞浪,等.基于 EDEM-Fluent 耦合仿真的射流式挖藕机设计与优化[J].中国农机化学报,2024,45(04):18-22+38.DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.04.003.
- [12]吴茗宇,徐陶祎,康之讷,等.水田环境下自走式智能莲藕采收机械的设计研究[J].企业科技与发展,2023,(11):36-40.DOI:10.20137/j.cnki.45-1359/t.2023.11.01