

基于树莓派的水下机器人系统设计

Design of underwater vehicle system based on
raspberry pie

学生姓名 曾凡晋 学号 201811911402
所在学院 电子与信息工程学院 班级 传感 1184 班
所在专业 电子科学与技术
申请学位 工学学士
指导教师 邹利兰 职称 讲师
副指导教师 职称
答辩时间 2022 年 5 月 28 日

目 录

设计总说明	I
INTRODUCTION	II
1. 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 国内外水下机器人研究现状	1
1.3 本文篇章结构	2
2. 硬件总体研究方案及设计	3
2.1 水下机器人系统设计	3
2.1.1 系统整体设计结构	3
2.1.2 水下机器人外观设计	4
2.1.3 系统框架、舱体及板材	4
2.2 电路板设计	5
2.2.1 千兆以太网交换机	5
2.2.2 电力载波通信模块	5
2.2.3 树莓派 4B	5
2.2.4 主控制器电路板	6
2.2.5 辅控制器电路板	7
2.2.6 W5500 以太网网络模块	7
2.2.7 电源控制电路板	7
2.2.8 高速无线调试器	8
2.3 低照度摄像头	8
2.4 无刷电机推进器	9
2.5 电池及电池保护电路板	9
2.5.1 电池组	9
2.5.2 电池保护板	9
2.6 传感器	10
2.6.1 水深传感器	10
2.6.2 陀螺仪	10
2.6.3 温度传感器	11
2.7 机械臂设计方案	11
3. 软件总体研究方案及设计	12
3.1 上位机设计方案	12

3.1.1 主流用户图形平台介绍	12
3.1.2 界面设计以及流程概况	12
3.1.3 软件设计流程图以及说明	13
3.1.4 摄像头视频监控及播放方案	14
3.1.5 上位机与下位机通信方案	15
3.2 下位机设计方案	16
3.2.1 软件设计流程图	16
3.2.2 主控制器软件设计	16
3.2.3 辅控制器软件设计	17
4. 系统测试	17
5. 总结与展望	19
5.1. 总结	19
5.2. 展望	19
鸣 谢	20
参考文献	21

设计总说明

基于当前水下作业领域存在人工成本高、危险系数大、工作难度大等痛点问题，为了更好帮助和解决水下作业行业存在的难题，本文致力于研究设计一款新型多功能水下作业 ROV 机器人，本文从硬件到软件的设计层面探讨了设计方案的可能性，并给出最终解决方案：（1）采用树莓派和 STM32F407 作为主控制器进行水下机器人系统设计。（2）结合 PID 运动控制算法实现机器人在水下平稳运行，并采用低照度摄像头结合树莓派安装 MJPG-streamer 构成网络摄像头，实时返回水下环境情况画面和利用多种传感器检测水下环境参数，如温度、深度和运行姿态等。（3）上位机采用 Qt&C++ 方案开发，在上位机采用 FFmpeg+SDL 方案播放水下实时图像和在界面显示机器人的运行参数，并可结合遥控器控制机器人的运行状态。（4）运用 W5500 网络模块实现单片机与上位机通过 TCP/IP 协议稳定通讯，同时利用电力载波通信方案实现远程操控机器人和水下数据监控，以及利用弱电控制强电方案来实现远程控制机器人通断电功能。（5）水下机器人搭载仿生机械臂可操控抓取水下物体。

关键词：水下机器人；Qt；PID 算法；FFmpeg；仿生机械臂

INTRODUCTION

Based on the problems of high labor cost, high risk coefficient and difficult work in the current underwater operation field, in order to better help and solve the problems existing in the underwater operation industry, this paper is committed to the research and design of a new multifunctional underwater ROV robot. This paper discusses the possibility of the design scheme from the design level of hardware to software, The final solutions are given: (1) The system design of underwater vehicle is carried out by using raspberry pie and STM32F407 as the main controller. (2) Combined with PID motion control algorithm to realize the stable operation of the robot under the water, and using low illumination camera combined with raspberry pie to install mjpg-streamer to form a webcam, which can return the underwater environment picture in real time and detect the underwater environment parameters, such as temperature, depth and running posture, using a variety of sensors. (3) The upper computer is developed with Qt & C++ scheme. The upper computer uses FFmpeg + SDL scheme to play underwater real-time images and display the operation parameters of the robot on the interface, and can control the operation state of the robot in combination with the remote controller. (4) The W5500 network module is used to realize the stable communication between the single chip microcomputer and the upper computer through TCP/IP protocol. At the same time, the power carrier communication scheme is used to realize the remote control robot and underwater data monitoring, and the weak current control strong current scheme is used to realize the power on and power off function of the remote control robot. (5) The underwater robot is equipped with a bionic manipulator, which can control and grasp underwater objects.

KEYWORDS: ROV; Qt; PID Algorithm; FFmpeg; Bionic manipulator

基于树莓派的水下机器人系统设计

电子科学与技术, 201811911402, 曾凡晋

指导教师: 邹利兰

毕业设计说明书

1. 绪论

1.1 课题研究背景

在全球人口急剧增加, 陆地资源日益匮乏的大环境背景下, 深入海洋开发已成为当前多数一个现代化国家发展的必经之路。人体最大下潜深度是 113 米, 而同为哺乳类动物的抹香鲸却能长时间在 2200 米深的海域进行觅食。我们的生理结构天然决定我们不能长时间在水下进行工作。研发一款能够代替人体深入水下进行探索的机器人对人类探索海洋有着非常重要的意义, 而水下机器人产业正是在此大环境背景发展起来的。

近些年, 深海网箱养殖产业不断壮大, 但由于养殖环境与养殖原理所限, 网箱内鱼类的活动情况, 网衣的「健康」状况等信息都只能凭养殖户用经验判断, 养殖风险大。据此实时的水下监控系统尤为重要。针对问题利用摄像头实时观察网箱内鱼类的状况、网衣的破损和清洁以及残饵、死鱼的情况, 并进行统计、分析、预警, 实现对深海网箱养殖的可视化监测和远程控制。

就湛江市而言, 海洋捕捞、水产养殖行业具有较大体量, 但目前仍以依靠人工劳动作业为主。但是单纯依靠人工作业容易受到环境的不稳定性等因素影响, 导致工作效率较低, 人工成本较高的问题, 这时全面推广水下机器人的机会自然应运而生, 不仅能解决现存的问题, 还有利于提高经济效益。另外在城市管道勘测、日常船体检修以及未知水域勘测等高危领域, ROV 能够取代传统人力作业所带来的危险, 有效降低人员作业风险以及因此而造成的经济损失。因此, 无论在水产养殖还是勘测水域方面, ROV 科技的研发无疑可以给养殖户和沿海渔民又或是水下作业高危行业带来大大的便利和效率以及提供更安全可靠的勘测手段, 所以提出了本课题的研究。

1.2 国内外水下机器人研究现状

目前, 水下机器人市场的“玩家”并不多, 真正有自主研发产品进入市场的更是屈指可数, 整个市场基本处于起步阶段。其原因在于进入这一领域的资金和技术门槛较高, 特别是真正作业用的水下机器人结构较为复杂, 研制周期相对较长, 产业化难度大。因此, 水下机器人领域既没有出现产业巨头, 也没有被充分开发, 因而消费人群挖掘潜力较大, 可谓是一片“蓝海”。业内人士表示, 水下机器人市场总量十分可观, 尤其是在专业级市场。过去许多高危、复杂、以及人力无法操作的水下工作都正逐渐被水下机器人所取代。未来, 水下机器人市场有望像无人机市场一样快速爆发。

1、国外研究

1953 年第一艘无人遥控潜水器问世, 特别 1974 年以后, 海洋油气业的迅速发展, 使无人遥控

潜水器进展飞速。

1980 年，法国国家海洋开发中心建造了“逆戟鲸”号无人无缆潜水器，最大潜深为 6000 米。

1987 年，日本海事科学技术中心研究成功深海无人遥控潜水器“海鲉 3K”号，可下潜 3300 米。“海鲉 3K”号属于有缆式潜水器，在设计上有前后、上下、左右三个方向各配置两套动力装置，基本能满足深海采集样品的需要。

1988 年，日本海洋科学技术中心配合“深海 6500”号载人潜水器进行深海调查作业的需要，建造了万米级无人遥控潜水器。

2018 年 4 月 24 日，日本东京大学和九州岛工业大学的团队宣布，研发出能自动在海底移动并捕获生物的机器人。据报道，与有人乘坐的探测船和带电缆的远程操控设备相比，该机器人的优点在于使用方便。据报道，该机器人边长约 1.3 米的立方体，最大下潜深度 2000 米。从海上的支持船上放下后，机器人可按预设路线自动航行。每隔几秒，机器人就会对海底进行拍摄，并挑选出不同寻常的地形、凹凸等可能存在生物的区域形状图片，发送给支持船。根据该图像指定对象后，机器人会返回相应方位，用装置吸入生物将其捕获。机器人在日本骏河湾潜入水深 80 至 120 米处，在海底成功采集到几厘米长的双壳贝的贝壳。研发团队表示，“若在拍摄图像外还能得到实物，就能有效开展调查”，希望对海底环境调查发挥作用。

近年来，伴随经济、社会的发展，海洋等水域开发日益深入，与水有关的科研、娱乐、旅游、救援等行业对于水下智能设备的需求持续提升。在机器人产业加速崛起的背景下，水下机器人正逐渐站上风口。

一直以来，水下机器人如同水下世界一般，给人以神秘莫测的感觉。从 1953 年第一艘无人遥控潜水器问世开始，水下机器人就活跃在军工领域，或是科研院所的实验室内。

美国作为强国之首，是世界上最先开展水下机器人开发的国家，技术领先优势明显。

此前，斯坦福大学曾研发了一款水下类人机器人，名为 OceanOne，背部安装了计算单元、电池、推进器等，能够像真人一样游泳，并使用人工智能和触觉反馈系统，向终端设备传递机器人手持东西的感受。

随着机器人技术的突破，世界其他国家都纷纷跟进水下机器人研发，传统的机器人强国日本在这方面也取得了积极进展。

2、国内研究

由于科研机构产业化动力不足及企业进入门槛相对较高等原因，我国水下机器人产业化多年来进展缓慢，但近几年有加快的趋势。对于国内水下机器人产业来说，目前也面临着不少问题。其中，最主要的就是国内的核心技术受制于国外，维修保障成本较高。因此虽然水下机器人行业需求很大，但是国产化进程缓慢，大规模量产困难，普及应用成本昂贵。不过，中国管辖海域面积达 300 万平方公里，相当于中国陆地面积的三分之一，可以说中国用于相当可观的海洋资源。此外，中国还有相当体量的湖泊、河流等水域，为水下机器人产业的发展提供了市场空间。

随着海洋经济发展日益被重视，国家和地方政府的支持力度也越来越大。另外，水下机器人应用领域不断拓宽，核心技术攻关也持续取得新进展。从现在的形势来看，中国民众的海洋意识正逐渐提升，对海洋的喜爱被慢慢激发出来，未来水下机器人的市场需求有望稳步扩张，市场前景十分值得期待。

1.3 本文篇章结构

本文篇章结构为：

第一章绪论介绍了本课题的研究背景，国内外的研究现状，水下机器人的应用领域及应用场景。

第二章介绍了硬件总体研究方案及设计，主要包括了机器人整体系统的设计，电路板设计，以及使用到的传感器、电源、机械臂等设计方案。

第三章介绍了软件总体研究方案及设计，主要包括上位机设计方案以及下位机设计方案。

第四章说明了机器人的实际水下测试情况以及系统运行表现。

第五章总结和展望，总结了本文已近完成的内容，分析了本文设计的不足和需要改进的地方。以及对未来工作进行展望。

2. 硬件总体研究方案及设计

2.1 水下机器人系统设计

2.1.1 系统整体设计结构

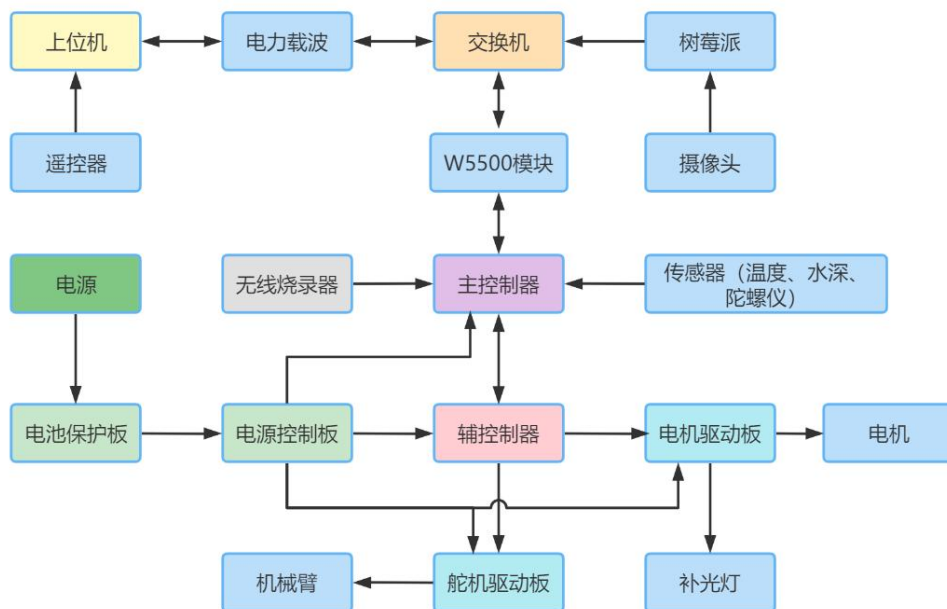


图 1-1 系统整体设计结构

本系统整体设计结构如图 1-1 所示，本系统主要由两部分组成，分别是上位机和下位机。

上位机采用 Qt&C++ 方案设计而成，安装在 PC 端，主要负责接收处理下位机回传的视频信号和系统参数等，并通过图形化界面显示出来。系统设计有专门的遥控器负责操控机器人，遥控器接入上位机，通过串口传输遥控指令给上位机，再由上位机处理后将指令分发至下位机执行。

下位机主要由三部分组成，第一部分是树莓派 4B，树莓派安装 Ubuntu Linux 系统。通过在此系统上安装 MJPG-streamer 软件，结合搭载的 USB 0.0001 lux 低照度摄像头构成网络摄像头，可以通过访问指定端口获取摄像头的实时画面数据。

下位机第二部分主要是基于 MCU STM32F407 的主控制器，在此设计有一个正点原子的无线调试器与主控制板相连，可以通过无线的方式烧录代码至主控制板，免除以往系统调试时需要拆卸再安装等繁琐步骤，此控制器连接了各类的传感器，如温度传感器、深度传感器以及陀螺仪等，可以

实时获得机器人系统在水下环境的各类参数。主控制器负责通过 SPI 协议与 W5500 网络模块相连接，W5500 网络模块集成 TCP/IP 协议栈，可以将主控制器的信息转换为网络流数据。W5500 模块再接入机器人系统的交换机。交换机与上位机通过电力载波模块构成局域网环境实现通信。

主控制器还与下位机的第三部分基于 STM32F103 的辅控制器通过串口进行通信。将上位机的系统运行指令处理后以指定的参数形式发给辅控制器。辅控制器接收到主控制器的信号后会输出相应的 PWM 信号至电机驱动板以及舵机驱动板，实现控制机器人的运动无刷电机、补光灯，以及机械臂。以上是本系统的主要设计说明。

2.1.2 水下机器人外观设计

水下机器人外观如图 1-2 所示：

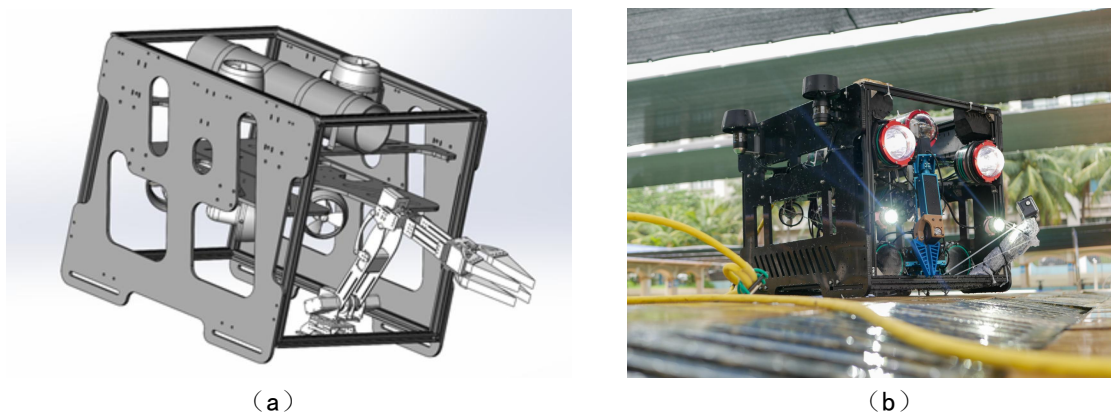


图 1-2 水下机器人外观图

2.1.3 系统框架、舱体及板材

机器人系统采用了铝合金 BLV 框架作为主体支架，如图 1-3 所示，铝合金与钢相比具有较低的密度，可以更好的控制机器人的整体重量，经过热处理后的铝合金具有不亚于钢的强度，能够更好的抵抗运输过程中或者系统运行时产生的碰撞。同时，铝合金还具有较好的耐腐蚀性，铝与外界接触会在其表面形成一层致密的氧化膜，这层氧化膜能够有效的防止外界因素对支架的进一步腐蚀，符合机器人系统需要长时间运行于水下的需求。铝合金支架对比于不锈钢支架与塑料支架表现出其优异的性能。综合考虑，本系统采用铝合金作为主体支架。

本系统采用亚克力圆柱形耐压密封舱，如图 1-4 所示，舱体内装载电路板、电池等系统所需模块。舱体设计为圆柱形，对其前后进行紧密封装处理。圆柱形的舱体结构对比于方形结构能有效的承受更高的水下压强，综合使得机器人的最大设计潜行深度达到 100 米以上。

固定在铝合金支架上的支撑板由一整块厚度为 10mm 亚克力板经激光切割而成。亚克力板具有较好的强度、刚度以及优异的抗腐蚀性能，能配合铝合金支架构成稳固的机器人系统结构。



图 1-3 铝合金支架图



图 1-4 亚克力圆柱形耐压密封舱外观图

2.2 电路板设计

2.2.1 千兆以太网交换机

本系统采用的交换机为自主设计的交换机，如图 2-1 所示，该交换机采用了 RTL8367 芯片，在该交换机上设计了 5 个千兆以太网口，可以满足系统传输多路摄像头视频流以及主控制器的信息与上位机进行通信。与市面上的产品相比，该交换机具有体积小，功耗低等优点。通过该交换机连接上位机、树莓派以及 W5500 模块，实现在水下机器人系统上构建局域网实现通信。

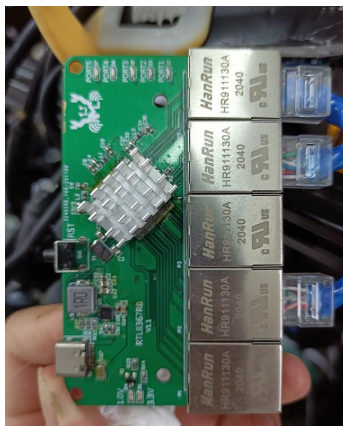


图 2-1 千兆以太网交换机实物图

2.2.2 电力载波通信模块

本系统采用了一对千兆以太网电力载波通信模块，如图 2-2 所示。传统双绞线不适合远距离传输以太网信号，且抗干扰能力较弱。本机器人系统采用的是有线连接的通信方案，设计最大通讯线缆长度为 300 米，因此综合考虑采用电力载波模块通过电力线，即零浮力线传输以太网信号。电力载波模块采用低功耗设计，满负载运行时功耗不到 3.5W，且可以实现多端组网。

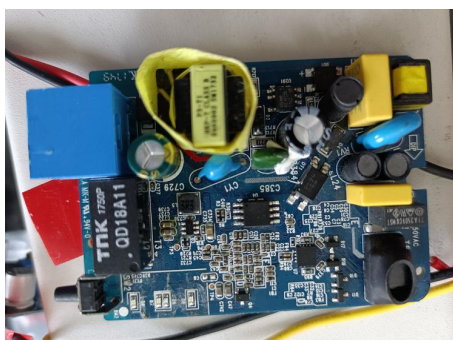


图 2-2 电力载波通信模块实物图

2.2.3 树莓派 4B

本系统主要采用树莓派 4B，如图 2-3 所示，作为摄像头数据流的传输终端，树莓派 4B 是一款基于 ARM 处理器微型电脑主板，可以运行 Linux 系统，树莓派 4B 与上一代产品相比，具有更高的时钟频率，达 1.5GHz，可以更加快速的执行指令。树莓派 4B 的网口升级为千兆以太网口，拥有更多的带宽，可以提供千兆的吞吐量，约为上一代的 5 倍，符合本系统对搭建多路网络摄像头所需带宽的需求。同时 USB 接口支持 USB3.0 协议，能与支持 USB3.0 的摄像头更好的进行数据传输。

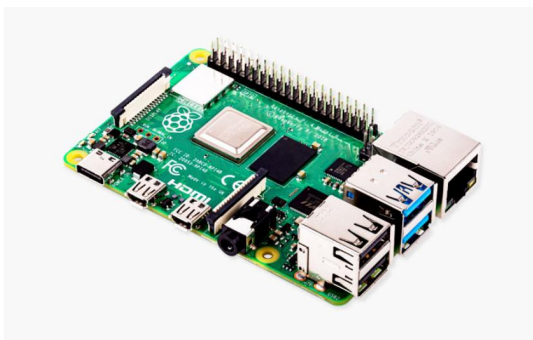


图 2-3 树莓派 4B 实物图

2.2.4 主控制器电路板

本系统主要采用了以 STM32F407VET6 为主控制器的主控制器电路板，如图 2-5 所示，STM32F407 系列芯片是由意法半导体公司生产的，是一款极为出色的微型控制器，在市场上有着广泛的应用，它相比于 STM32F103 系列具有更高的主频和更多的外设，同时具有浮点单元(FPU)，能够支持高速的浮点运算，性能提升数倍。考虑到机器人系统采用 PID 算法进行运动控制，需要高速的运算能力，同时系统需要处理各类传感器的信息参数，以及和上位机进行通信。因此采用 STM32F407VET6 作为主处理器。主控制器电路板上包含了电源适配电路，时钟电路，通信接口以及传感器接口等。

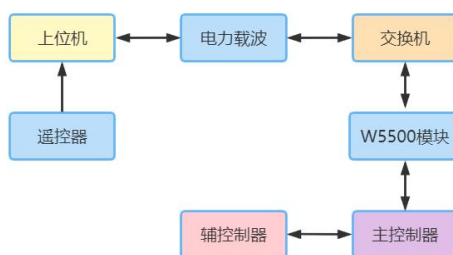
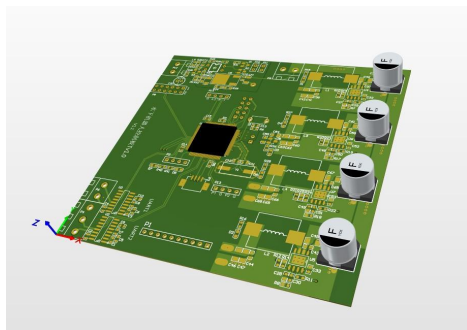
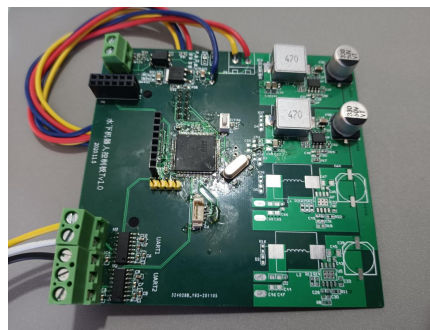


图 2-4 主控制器与上位机通信连接示意图



(a)



(b)

图 2-5 主控制器电路板实物图

2.2.5 辅控制器电路板

在主控制器的基础上，本系统采用了基于 STM32F103C8T6 芯片的电路板作为辅控制器，如图 2-6 所示，辅控制器主要用于连接电机驱动板以及舵机驱动板，通过串口与主控制器进行通信，接收主控制器的信号并输出 PWM 信号给驱动板，实现控制电机的运转及机械臂的运动状态。

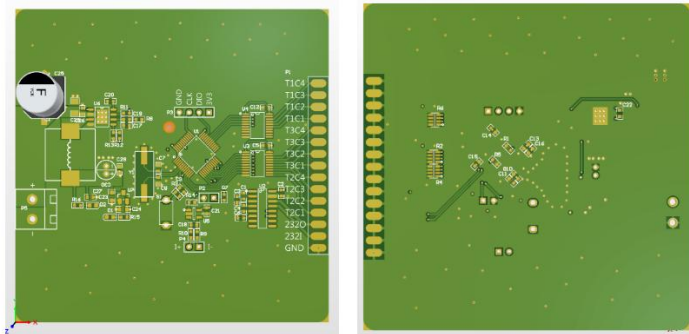


图 2-6 辅控制器电路板 PCB

2.2.6 W5500 以太网网络模块

本系统采用的 W5500 模块为一款基于 WIZNET 型号芯片的 W5500 以太网通信模块，如图 2-7 所示，模块内集成了全硬件的 TCP/IP 协议栈，可以无需代码实现 TCP/IP 协议栈，最高支持 100Mbps 的传输速率，还支持休眠模式和网络唤醒模式，在其内部集成 32K 的 TX/RX 缓存空间，支持 8 个独立的端口同时运行，电源模块支持 3.3V 或 5V 供电，方便在不同的单片机系统中使用此模块与单片机系统的通讯，通讯方式采用 SPI 协议，最高支持达 80M 的 SPI 时钟频率。

通过此模块便可以将主控制器 STM32 芯片上的数据转换为网络流数据，上位机可以通过与该模块建立 socket 连接，通过访问指定端口就可以获取到主控制器的数据，实现数据通信。

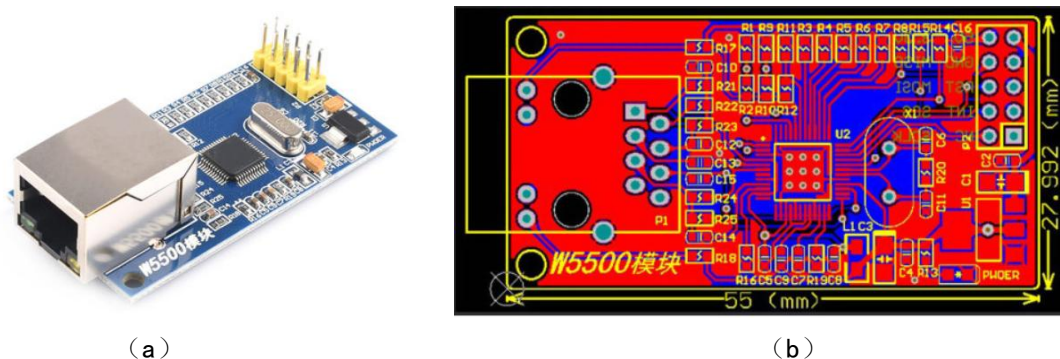


图 2-7 W5500 以太网网络模块实物图

2.2.7 电源控制电路板

本系统设计了电源控制电路板，如图 2-8 所示，利用 MOS 管的栅极和源极之间的电阻为场效应管提供偏置电压原理，保证场效应管安全稳定运行。

在电源控制电路板左测焊接多块高阻值电阻作为泄放电阻来泄放掉 G-S 的少量静电，防止 MOS 管产生误动作，甚至击穿 MOS 管（因为只要有少量的静电便会使 MOS 管的 G-S 极间的等效电容产生很高的电压），起到了保护 MOS 管的作用。

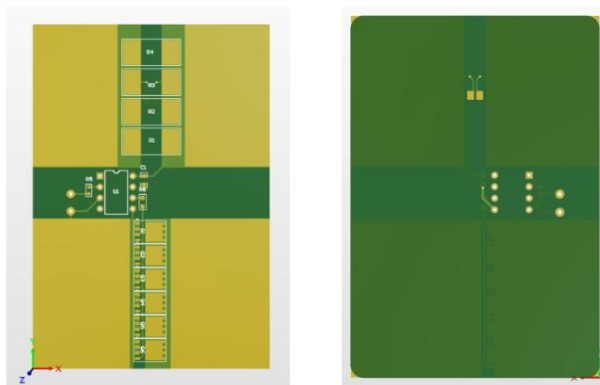


图 2-8 电源控制电路板 PCB

2.2.8 高速无线调试器

本系统在主控制器采用了正点原子的高速无线调试器，如图 2-9 所示，该调试器可以实现通过无线方式烧录程序代码，调试执行程序，可以在主控制器密封之后需要调试代码时不用经过拆装等繁琐步骤，减少机器人系统的开发以及维护的工作量。



图 2-9 高速无线调试器实物图

2.3 低照度摄像头

本系统采用 USB3.0 IMX290 高清 200 万像素低照度摄像头模组。如图 2-10 所示，最低照度 0.0001lux，适用于水下低亮度环境。支持 1920*1080 60 帧画面，为图像识别提供高质量数据。支持 Linux 系统，方便结合树莓派使用。此水下机器人共使用三组该低照度摄像头模组，为水下机器人提供前行视野，尾部监控及机械臂作业监控。摄像头输出视频流格式为 MJPG/YUY2。

摄像头与树莓派可以搭建成网络摄像头，通过访问指定的 IP 地址就可以获取到对应的视频流数据，进而在上位机中实时播放出来，可以通过此了解水下环境以及机器人的运动状况。

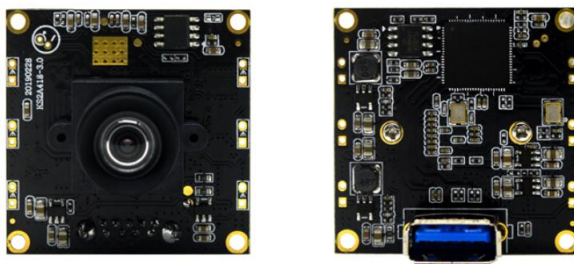


图 2-10 摄像头模块实物图

2.4 无刷电机推进器

垂直推进器: T80-60, 该推进器螺旋桨直径为 80mm, 单枚推力可达 7.7kgf。本机器人系统搭载了 4 枚 T80-60 的推进器负责垂直上升下沉控制。

水平推进器: T60-30, 该推进器螺旋桨直径 60mm, 最大推力可达 4kgf, 该机器人采用 4 枚 T60-30 的推进器负责水平方向的运动控制。



图 2-11 无刷电机推进器实物图

2.5 电池及电池保护电路板

2.5.1 电池组

本系统主要采用 54 节 21700 电池构成的大容量电池组作为电源, 如图 2-12 所示, 电池单体容量比 18650 高 35%, 电池系统能量密度提升约 20%, 等同能量下所需电池单体的数量可减少约 1/3, 电池系统成本上可以下降 9%, 电源装配采用易拆卸更换结构方案, 方便更换电池组和充电。

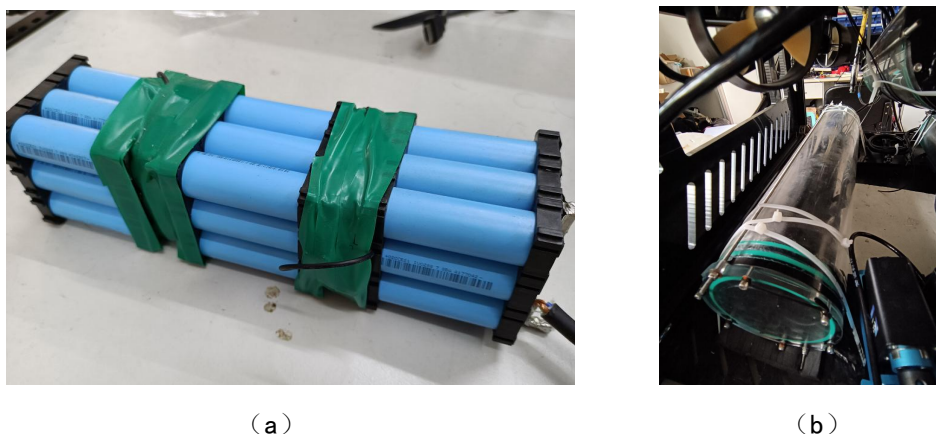


图 2-12 电池组实物图

2.5.2 电池保护板

电源设置有自主设计电源保护板, 如图 2-13 所示, 保护板具有过载保护功能, 可以防止电池发生过流、过载等现象, 有效保护电池健康工作, 延长电池寿命。电源保护板再接入电源控制板, 由电源控制板对电源进行降压、升压等处理, 再分发电源至系统各类模块, 如主控制器、辅控制器、电机驱动板、舵机驱动板等。

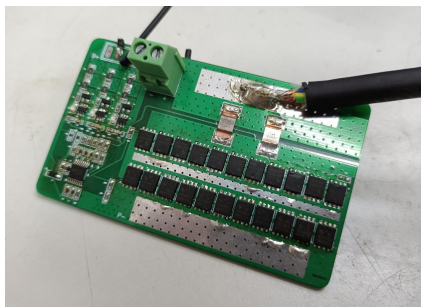


图 2-13 电池保护板实物图

2.6 传感器

2.6.1 水深传感器

本系统采用深度传感器为高精度水深传感器 MS5837，如图 2-14 所示，这款传感器是一款高分辨率的水深传感器，最大量程可达 3Ma（约 300 米水深）。传感器可通过螺母安装于设备上。该水深传感器内置了高分辨率的 I2C 接口 MS5837 压力传感器，水深测量分辨率可达 2mm。

MS5837 压力传感器集成了超低功耗的 24 位 ADC 和压力传感元件，此压力传感元件具有高线性度，出厂时设置了工厂校准系数。可依据实际应用需要配置功耗和转换速度，并且设置了校准温度传感器。压力传感器通过结合各种微控制器，使得无需修改内部寄存器和通过简单的通讯协议便可实现通信。

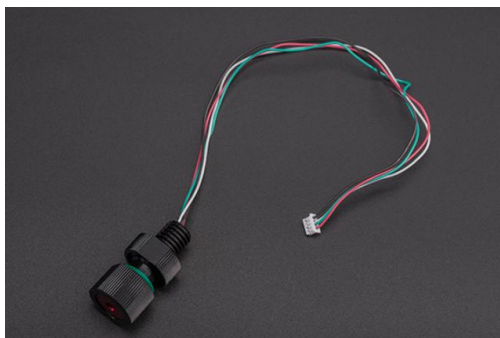


图 2-14 水深传感器实物图

2.6.2 陀螺仪

本项目选用陀螺仪 MPU-9250 为水下机器人获取机器人自身姿态以及相关运动信息。其可以保证机器人在水中行进时的精确性，以及机器人在水中姿态的稳定性。同时，在水下机器人水下作业时，获取到机器人的姿态信息，结合 PID 算法可以保证作业对机器人姿态及运动状态的影响得到及时纠正。MPU-9250 内部集成了陀螺仪、加速度计以及磁力计。精度出厂设置了 16 位数字量输出。可以通过 I2C 通讯协议实现和各类单片机进行数据通信，最高传输速率可达 400 kHz/s。MPU-9250 设计了数字运动处理器的硬件加速引擎，可以通过融合计算九轴传感器数据，输出完整的 9 轴融合演算数据。

同时该模块还集成有指南针功能，可以实时输出方向数据，从而获得机器人的运动方向以及计算出机器人的运动路径。

2.6.3 温度传感器

本系统采用温度传感器 DS18B20 检测水下环境温度，传感器如图 2-15 所示，DS18B20 采用了密封胶灌封，密封胶具有导热性高的优点，既实现了温度测量，保使温度传感器的灵敏性和延迟等特新得到了保证，又能支持传感器实现防水防尘功能。温度传感器支持通过 I2C 通讯协议实现和各类单片机进行数据通信。DS18B20 测量温度范围为-55 摄氏度~+125 摄氏度，在-10~+85 摄氏度范围内，精度为 ± 0.5 摄氏度。通过配置为总线通信的方式，保证了系统的抗干扰性。适用于各种恶劣环境的现场温度测量。因此本系统采用该传感器来测量温度数据。



图 2-15 温度传感器实物图

2.7 机械臂设计方案

机械臂为自主设计开发，采用主从控制的方式实现机械臂的远程精准控制。

机械臂材质：主体采用 1060 型铝合金，表面经过氧化处理，能够抵御海水的腐蚀，保证了水下机械臂在海水中的长时间稳定作业。

机械臂结构：采用五轴机械臂结构，灵活度高，能够满足水下不同环境的多种作业方式，通过搭配不同的夹取工具，实现多种作业任务。另外，搭配机械臂搭配金属夹爪可以实现对水下矿物夹取。若搭配自主设计的 3D 打印柔性鳍夹爪，可以利用其柔韧可形变性实现对水生生物的无害抓取，还可以搭配机械剪，实现对水下绳缆的剪切作业。

机械臂动力源：采用大扭矩防水舵机作为动力源，该舵机峰值扭矩能够达到 30KG-CM,通过 1:2 齿轮组的减速，动力更加强劲。其最大工作深度为 200 米，基本能够满足一般的浅海作业环境。

主从控制：工作的机械臂为从动机械臂，主动机械臂为控制器。控制器以从动机械臂的特征结构按 1:5 的比例缩小。主控制内置位置编码器，可将旋转角度发送给 STM32 主控芯片，STM32 处理数据后发送 PWM 信号到舵机控制便以此实现从动机械臂执行与主动机械臂运动跟随的效果。

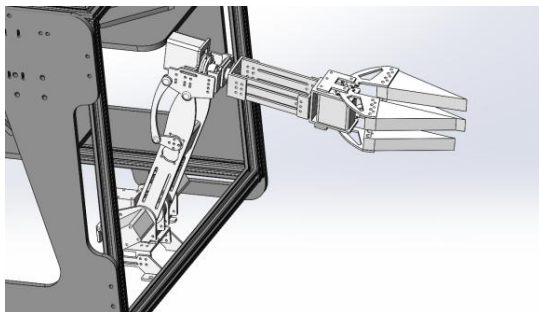


图 2-16 机械臂三维模型图



图 2-17 机械臂实物图

3. 软件总体研究方案及设计

3.1 上位机设计方案

3.1.1 主流用户图形平台介绍

WPF/Winform C#应该是目前 Windows 平台下开发图形用户界面应用程序使用最广泛的编程语言了,在桌面软件开发中一直占据着非常重要的位置,尤其对于信息管理系统来说,可以说是非常合适,自带有图形用户设计界面,只需简单拖拽控件,编辑属性,就可快速开发一个 GUI 可视化界面,支持各种主流数据库开发,包括 MySQL、Oracle、SQL Server 等,如果你需要快速开发一个适合于 Windows 平台的桌面应用,那么 C#无疑是首选。

Delphi 是 Windows 平台下一个使用广泛的桌面应用程序开发工具,在早期的 Windows 桌面开发中,Delphi 一直占据着主导地位,使用率和普及度非常高,相对于没有任何编程基础的开发人员来说,Delphi 学习成本低,简单易学,容易上手,只需简单拖拽控件、设计属性,就可快速创建一个 GUI 程序,编译、开发、调试效率非常高,不过随着 C#的兴起,Delphi 的应用范围有些缩减,但对于桌面开发来说,也是一个利器。

Qt 是一个 1991 年由 Qt Company 开发的一个免费、开源、跨平台的桌面应用程序开发框架,基于 C++开发而来,在目前跨平台的桌面应用中,有着较为广泛的使用率,简单易学,容易上手,而且 UI 界面设计非常不错,可以基于 CSS 进行美化。Qt 采用了图形界面设计与逻辑代码功能分离的编程机制,用户可以通过官方发布的 Qt Designer 开发工具实现鼠标按键点选拖拽就可以快速完成图形界面开发。同时 Qt 提供了一套信号/槽(signals/slots)的编程机制来实现图形界面与响应函数实现绑定。以此来替代了 C++语言里的 Callback 函数的功能。同时得益于 Qt 模块化程度高的封装机制,可以通过调用各个模块来实现快速添加某类功能,比如网络模块、蓝牙模块、音视频模块等等。不仅让工作量得到了大大的减少,同时也使开发变得非常简单。

3.1.2 界面设计以及流程概况

由于考虑到本机器人系统后期将转入 Linux 系统上进行嵌入式开发,所以需要进行跨平台开发,综合考虑各个平台的优缺点后,最终我们选择了 Qt&C++的方案,采用 Visual Studio 2019+Qt 5.14 构建开发环境。

上位机图形界面如图 3-1 所示,在控制界面左侧,主要负责显示机器人的运行状态信息,包括指南针方向、航行姿态、电池电量,以及会在在信息栏会显示各种运行信息。通过点击参数设计按钮,可以跳转到参数设计界面,如图 3-2 所示。在界面的中间部分,设计有三个摄像头视频监控窗口。在界面右侧,设计有摄像头 IP 地址信息绑定按钮,通过拖动按钮至视频监控窗口即可播放对应摄像头视频,可以通过点击新增,修改或删除该按钮,点击新增或修改会跳转到设置摄像头 IP 界面,如图 3-3 所示。此外还可以一键保存所有的运行状态信息及摄像头监控视频。

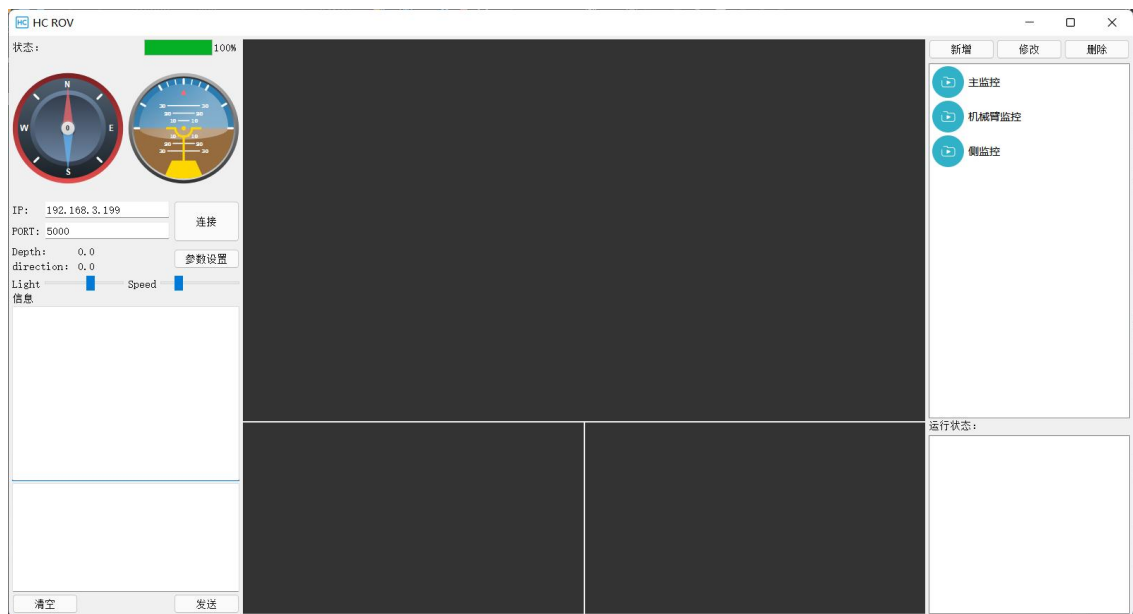


图 3-1 上位机图形界面图

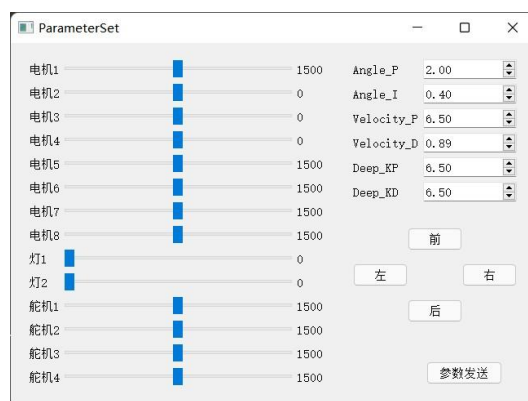


图 3-2 参数设置界面图

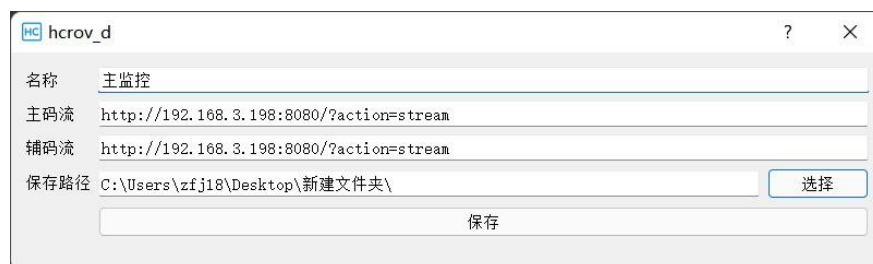


图 3-3 摄像头 IP 设置界面图

3.1.3 软件设计流程图以及说明

上位机的程序设计主要如图 3-4 所示，由 main 函数的主函数入口初始化 hcrov 系统处理终端以及开启 client 监听线程。系统处理终端调用视频播放接口和数字显示接口，进行摄像头视频播放和显示各类运行状态参数。系统处理终端通过监听线程与下位机 socket 连接进行通信，并且系统处理终端负责处理接收 control 控制端的指令在由 socket 发送指令到下位机。

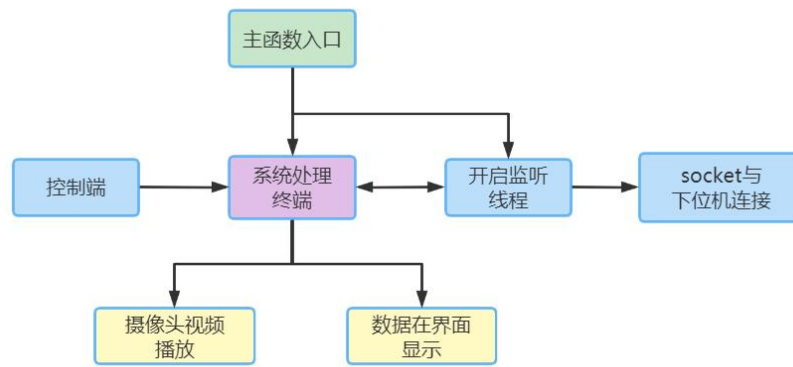


图 3-4 软件设计流程图

3.1.4 摄像头视频监控及播放方案

3.1.4.1 构建网络摄像头

MJPEG-streamer 是一款基于 IP 地址的免费视频流服务器。MJPEG-streamer 是一款运行在 Linux 系统上的软件，它可以兼容接在 Linux 系统上的各类摄像头，该软件的主要工作流程是：首先读取 USB 摄像头的的数据流，将摄像头的数据通过特定文件形式在树莓派保存起来，接着再去读取这文件中数据进行处理，以特定的协议和格式如 RTSP 等转换为网络流数据，再将这些数据输出到局域网上，这样就可以通过 HTTP 协议去访问指定的 IP 地址和端口就可以获取到摄像头视频的网络流数据，从而实现在上位机上获取到视频数据并解码显示出来。

因此结合 MJPG-streamer 和在树莓派上安装的 ubuntu Linux 系统，就可以搭建一套网络摄像头。其中通过配置多套摄像头 IP 可以实现多路监控摄像头方案，如图 3-5 所示。

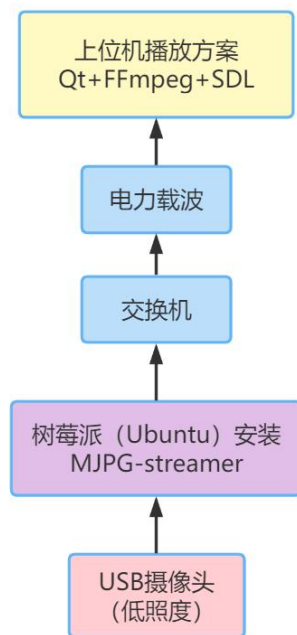


图 3-5 网络摄像头流程图



图 3-6 上位机播放方案流程图

3.1.4.2 上位机播放方案

FFmpeg 是一款负责处理音视频，实现音视频封装、编码以及解封装、解编码等多功能开源程序。FFmpeg 采用 LGPL 或 GPL 许可证。它提供了录制、转换以及流化音视频的完整解决方案。FFmpeg 可以实现多平台开发。FFmpeg 为开发者提供的 SDK 是各个不同平台编译完成的库。我们可以根据自己的需求使用这些库开发自己的应用程序。

因此，本系统采用 Qt+FFmpeg+SDL 的方案在上位机开发视频播放功能，通过在局域网内访问水下机器人上树莓派设置好的摄像头 IP 地址，就可以获取摄像头视频资源，再通过 FFmpeg 可以对视频资源进行解编码获得对应的视频帧数据，再经过 SDL 将视频画面渲染播放出来。此套方案可以极大程度降低播放延迟时间，并且可以通过开启多线程实现多路摄像头视频同时播放方案。

3.1.5 上位机与下位机通信方案

3.1.5.1 通信协议

本系统的上位机和下位机主要采用了 TCP/IP 协议栈中的 TCP 传输协议来实现通信，TCP 协议位于 TCP/IP 协议的传输层，基于 TCP 传输层创建 socket 编程实现通信。此外同为传输层还有 UDP 协议，与 UDP 协议相比，TCP 协议具有更为可靠的特性，因为 TCP 协议在建立连接和断开连接时要经历三次握手和四次挥手等步骤，确保对方收到信息后才继续发送下一帧信息。UDP 协议是一种广播式通信，不管对方是否接到信息都一直发送直到发送完毕。

3.1.5.2 通信方案

本系统采用方案为下位机主控制器 STM32 通过 SPI 协议与 W5500 网络模块相连接，将 STM32 上的数据以字节形式传输到 W5500 模块的发送接收缓存区，W5500 模块创建 socket 配置为客户端模式，然后上位机开启监听线程，创建 socket 配置为服务端模式。上位机与 W5500 模块建立连接，通过 TCP/IP 协议传输数据实现通信。通信方案流程图如图 3-7 所示。

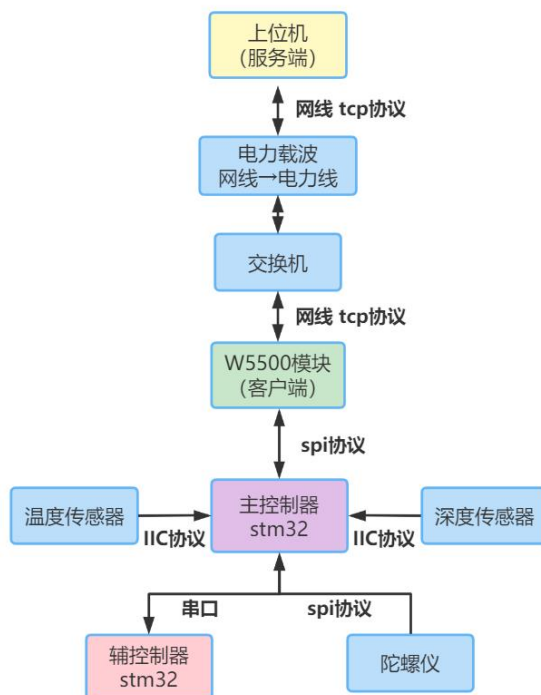


图 3-7 通信方案流程图

3.2 下位机设计方案

3.2.1 软件设计流程图

下位机软件流程如图 3-8 所示，程序从 `main()` 函数入口开始，进入系统初始化，再进入 W5500 模块、定时器以及串口初始化。初始化 W5500 模块后会与上位机建立连接，实现上下位机通信。定时器初始化后会定时循环读取各个传感器的数值，同时将深度及姿态角数据传送给 PID 运行函数，PID 算法结合深度、姿态角等数据计算出机器人的运动指令，运动指令在串口初始化后通过串口传输给辅控制器，辅控制器接收到运动指令后输出 PWM 信号给电机实现运动控制。

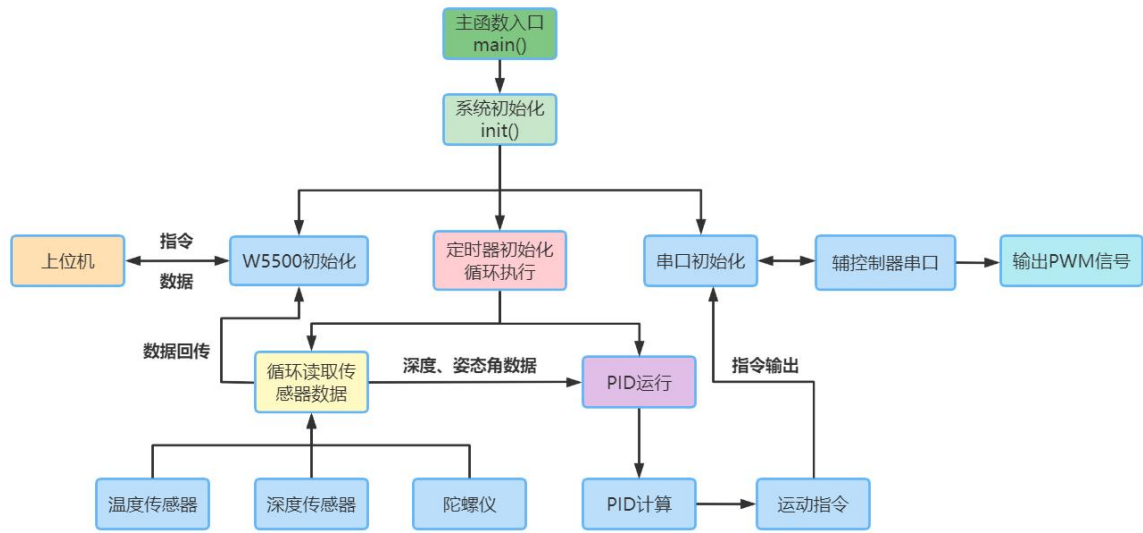


图 3-8 下位机软件流程图

3.2.2 主控制器软件设计

3.2.2.1 PID 算法控制水下机器人运行

PID 控制算法是结合了比例、积分和微分三项于一体的控制算法，是应用最为广泛、技术最为成熟的一种控制算法，适用于对被控对象模型了解不清楚的场合。实际运行的经验和理论的分析都表明，运用这种控制规律对许多工业过程进行控制时，都能得到比较满意的效果。PID 控制的实质就是根据输入的偏差值，按照比例、积分、微分的函数关系进行运算，运算结果用以控制输出。

本系统采用了 PID 算法对机器人的运动姿态进行自动矫正，在调试时会设置好相应的 PID 参数，系统运行后会结合当前的深度以及陀螺仪返回的姿态角计算得出机器人的运动指令，保证机器人在水下处于立正姿态运行。

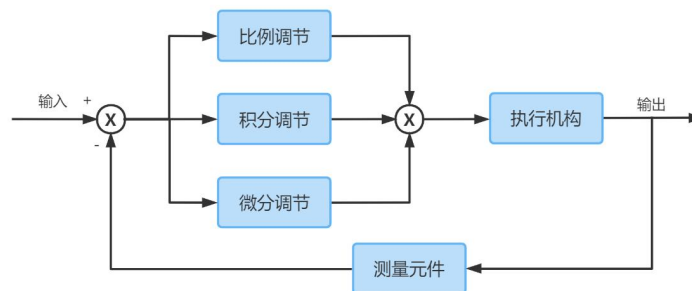


图 3-9 PID 算法流程图

3.2.2.2 系统异常判断及处理

上位机连接下位机后，会定时发送心跳包给下位机，在规定时间内等待下位机回复，如果超时未收到回复，就会判断下位机处于异常状态，强制让下位机重新启动。若重新启动失败则让机器人处于断电状态，机器人会自动上浮至水面进行回收检修。

下位机当检测到电源电量不足或者发生过流、过载现象时会自动重启系统，重启后若再有异常则自动断电上浮至水面进行回收检修。

3.2.3 辅控制器软件设计

本系统采用基于 STM32F103 辅控制器电路板，STM32F103C8T6 具有体积小，功耗低等优势，最多可同时输出 16 路 PWM 信号。通过串口接收主控制器发送的信号，利用单片机的定时器输出 PWM 信号来驱动电机、照明灯以及舵机等。

4. 系统测试

本系统已经经过真机下水测试，测试主要分为三个阶段，测试环境分别是小泳池（1 米水深）、学校游泳池（2.5 米水深）和湖光岩（30 米水深）。

第一阶段主要是在小型游泳池进行测试，测试项目包括舱体密封性和防水性，系统启动运行等。测试过程中，硬件舱体和电池舱体都没有出现漏水情况，密封状态良好。下位机远程控制上电正常，系统启动正常，上位机操控正常，电机以及灯光正常运转，达到预期目标。

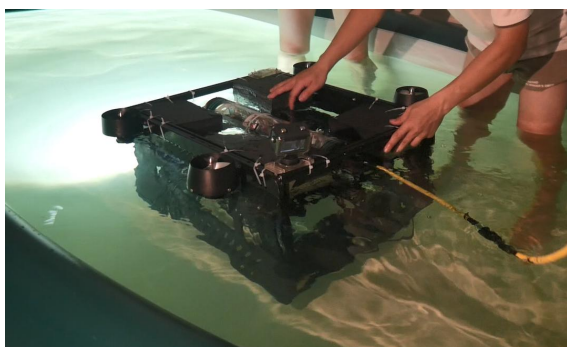


图 4-1 小泳池测试图

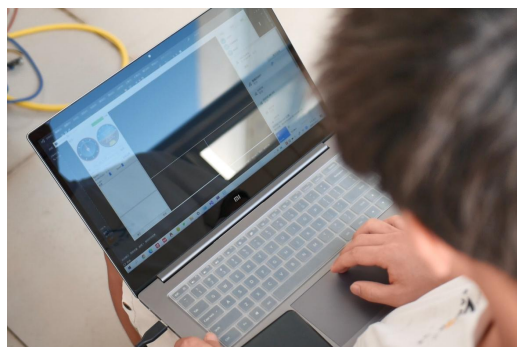
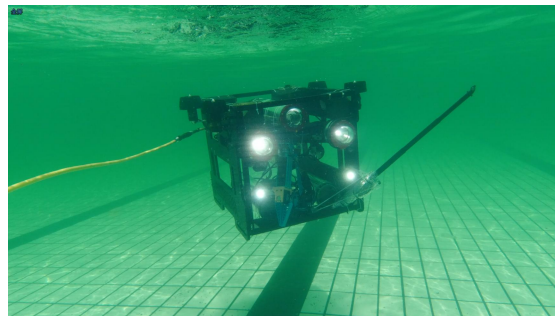


图 4-2 上位机连接测试图

第二阶段主要是在学校的游泳池进行测试，测试项目包括机器人运动控制、机器舱体密封性和防水性，PID 参数调节，续航时间等。机器人在游泳池里能够正常的被上位机操控运动，方向转换以及上下浮动正常。模拟激烈碰撞及大风浪等恶劣环境，结构上无松动，舱体无漏水等现象。PID 参数经过多轮调试达到良好运行水平，能够实现在水下定深运行，始终保持运行时处于平衡姿态。经测试，续航时间达到 3 小时以上，符合预期目标。



(a)



(b)

图 4-3 学校游泳池测试图

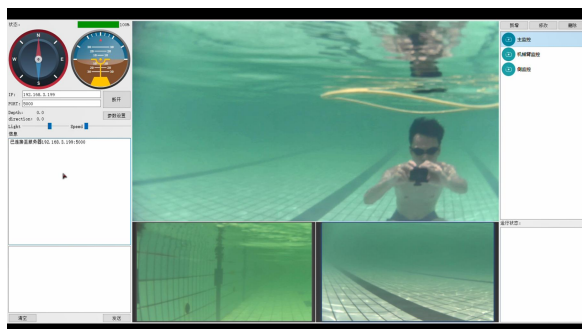
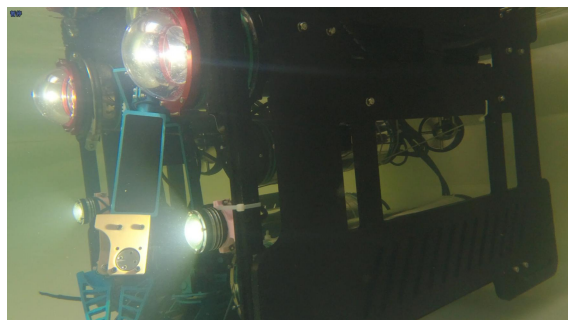


图 4-4 上位机演示图

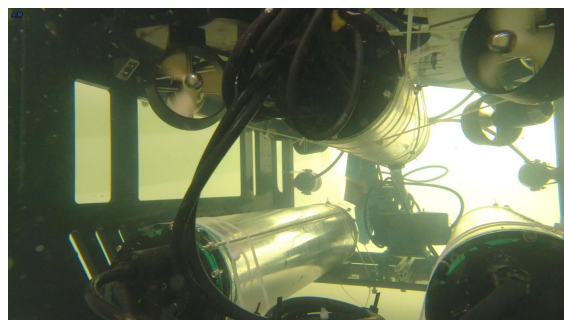


图 4-5 操控系统运行图

第三阶段主要是在湖光岩进行测试，测试项目包括机器人的抗压性和抗腐蚀性，大范围运动控制性能，机械臂抓取物体，系统异常处理等。机器人在湖中不同深度的不同水压环境下能够正常运行，操控机械臂能够顺利抓取水下目标物体。模拟系统发生异常，异常处理系统能够及时响应并且作出指定动作重启系统及回收机器人。经测试，系统结构能够承受住湖中的复杂环境，有着良好的运行性能，达到预期目标。



(a)



(b)

图 4-6 湖光岩测试图

经测试，在各测试环境中系统都能够正常稳定运行，通信连接正常，数据收发正常，在深水下依然能够稳定出色地工作。符合最初设计目的，达到实际应用需求效果。

测试地点	水深/m	稳定性	密封性	机械臂	系统异常	数据通信	续航/h
小泳池	1	正常	正常	不测试	不测试	正常	不测试
游泳池	2.5	正常	正常	正常	正常	正常	3
湖光岩	30	正常	正常	正常	正常	正常	3

表 4-1 系统测试

5. 总结与展望

5.1. 总结

本文致力于研究设计一款新型多功能水下作业 ROV 机器人, 本文从硬件到软件的设计层面探讨了设计方案的可能性, 并给出了最终解决方案。该系统经过实际测试, 系统运行各项指标正常, 证明该系统的可靠性和稳定性有着较高的水平。但目前该系统仍存在许多的不足, 如上位机界面设计相对简陋, 机器人线路排布相对混乱, 机械臂功能有待进一步提升等等。下一步将致力于:

(1) 实现水下机器人的图像处理, 研究基于深度学习和神经网络的图像特征提取算法和养殖对象图像识别算法, 对水下机器人拍摄的水下图像进行目标识别、生物运动行为鉴别与数据统计。

(2) 实现水下机器人的自动巡航与控制, 研究智能导航避障与控制算法, 结合自主开发的水声传感器, 水下机器人对以往的巡航路径进行记忆和学习, 实现水下轨迹自主规划、水下定高巡航、规避障碍、上浮下潜和实时数据传输。以及仿生机械手的智能运动控制和目标精准捕捉。

5.2. 展望

水下机器人可以广泛运用于浅水区域。在水产养殖领域, 水下工作者的人身安全得到了保障, 且可以实时监控、采集所需数据。在水下工程领域, 比如跨海桥梁的桥墩状况监测和水下布线的环境探测, 运用水下机器人等相关技术, 减少人力投入, 降低成本、提高效率。随着海洋资源开发与利用、海洋环境生态保护、潜水员用工成本升高以及水下作业的高危险性等方面越来越引起人们的重视, 用水下机器人替代潜水员、辅助大型作业船来开展水下作业的需求呼声渐高。希望本文研究能在供给侧与需求侧共同推动水下机器人产业发展, 助推海洋强国的建设。

鸣 谢

时光犹如白驹过隙，转眼间大学 4 年已经接近了尾声。回想起当初刚来到学校的时候懵懵懂懂的，由什么都不清楚不了解，慢慢的开始跟老师和同学们熟悉起来，也开始逐渐适应大学的生活。四年里，我没有停止学习的步伐，不断的在课堂上与书籍中寻找问题的答案。

经过几个月的努力，我终于完成了我的毕业设计。在这个过程中，其实并不是一帆风顺的，我遇到了很多困难和挫折，也遇到过很多从来没有见过的问题，但这些问题最终都在老师和同学们的帮助下，以及在书籍和探索中寻找到了答案。我很高兴能用我大学里面所学的专业知识来完成我的毕业设计。这是对我大学学习的一个检验，同时能完成这件作品对我来说也是一种肯定。

首先我非常要感谢我的指导老师，她在整个过程中给予了我非常大的帮助，在我遇到困难的时候，能用非常巧妙的方式指点我找到问题的根源并解决问题。尤其是在完成作品后，在老师的指导下，我才更好的完成了毕业论文的写作。虽然有学习过文献检索与论文写作这门课程，但在实际操作的时候还是会遇到很多的困难，比如检索操作不标准和书写格式不规范等问题。老师都一一给我指点出来，并且指导我正确解决方法。

其次要感谢的是我所加入的实验室团队，在大一的时候我就开始加入科技创新团队了，在团队里由一开始什么都不会慢慢的在团队指导老师和师兄们的帮助下学会了如何动手去制作一件作品。在不断参与项目与参加比赛的过程中，我的专业技能和专业知识以及动手能力都有了很大的提升。这些知识与能力为我能很好的完成这份毕业设计奠定了良好的基础。在此我要非常感谢实验室团队这个平台，让我得到了成长。

最后还要感谢学校和所有的帮助过我的老师以及同学们，是你们陪伴了我走过大学的生涯以及成就了今天的我，谢谢你们。

参考文献

- [1]姚磊钧. 水下检测技术及水下遥控潜水器应用分析[J]. 四川水利, 2021(S2):50-52+67.
- [2]潘娜娜,陈娜,王芳. 基于PID的水下机器人运动控制系统的设计[J]. 石河子科技, 2021(06):57-58.
- [3]陈天乐,胡江诚,于福一,王昊宇,李赢,杨影. 水下管道智能清洁机器人的研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(35):32-35. DOI:10.19981/j.cn23-1581/G3. 2021. 35. 008.
- [4]杨崔波. 水下机器人ROV用零浮力光电复合缆的研究[J]. 电子技术, 2021, 50(10):230-231.
- [5]谢欣. 智能机器人控制系统技术在环境监测中的应用[J]. 环境与发展, 2020, 32(10):86-87.
- [7]龙建成,彭彬烘,田秀云,王慧,陆源,张逸华,陈倬彬. 水下救援机器人的设计与实现[J]. 电子制作, 2022, 30(07):30-32. DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn. 2022. 07. 020.
- [8]范刚,张亚,赵河明,李波. 水下机器人定位导航技术发展现状与分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(03):22-29.
- [9]罗颖杰,罗勇杰,张家伟,孙之杭,蔡静俏. 基于仿生机械臂与AI深度视觉的ROV水下机器人[J]. 长江信息通信, 2022, 35(01):19-22.
- [10]柏宇鹏,崔金香,郑桂华,韦智然,赵爽. 水下智能机器人的运动控制技术研究[J]. 南方农机, 2020, 51(11):31.
- [11]Mingyang Wang. Trajectory tracking of underwater vehicle based on PID control calculation method[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(12).
- [12]Uchihori Hiroshi. The future of autonomous underwater vehicle control[J]. Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems, 2021, 3(3).
- [13]Qin Zhang et al. Virtual Submerged Floating Operational System for Robotic Manipulation[J]. Complexity, 2018, 2018.
- [14]Lu Tong, Dou Yinke, Wang Yu-Chen. Design of Arctic Sea ice monitoring ROV based on STM32[P]. Taiyuan Univ. of Technology (China), 2022.
- [15]William Furlow. All-electric ROV designed for ultra-deepwater applications[J]. Offshore: Incorporating the oilman, 2000, 60(3).
- [16]Choi Jin Kyu, Araki Eiichiro, Kawaguchi Katsuyoshi. Cable Laying Using an ROV[J]. MARINE TECHNOLOGY SOCIETY JOURNAL, 2020, 54(5).

附 录