

分类号: TP242.6

单位代码: 10335

密 级: 公开

学 号: 22234093

浙 江 大 学

硕士学位论文



中文论文题目: 基于碟形海底 AUV 的
敏捷运动特性研究

英文论文题目: Researchn on Agile Motion
Characteristics Based on
Dish-shaped Undersea AUV

申请人姓名: 彭俊超

指导教师: 周晶教授

合作导师:

学科(专业): 机械

研究方向: 水下机器人

所在学院: 海洋学院

论文递交日期 2025 年 06 月 05 日

基于碟形海底 AUV 的

敏捷运动特性研究



论文作者签名: _____

指导教师签名: _____

论文评阅人 1: _____ 隐名评阅 1

评阅人 2: _____ 隐名评阅 2

评阅人 3: _____ 隐名评阅 3

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 黄豪彩 \ 教授 \ 浙江大学

委员 1: 蒙小飞 \ 高级工程师 \ 华润电力

委员 2: 宋宏 \ 副教授 \ 浙江大学

委员 3: _____

委员 4: _____

委员 5: _____

答辩日期 2024 年 05 月 31 日

Researchn on Agile Motion

Characteristics Based on

Dish-shaped Undersea AUV



Author's signature: _____

Supervisor's signature: _____

External reviewers: _____ Anonymous reviewer 1

_____ Anonymous reviewer 2

_____ Anonymous reviewer 3

Examining Committee Chairperson:

_____ Huang Haocai \ Professor \ Zhejiang University

Examining Committee Members:

_____ Meng Xiaofei \ Senior Engineer \ Huarun Electric Power

_____ Song Hong \ Associate Professor \ Zhejiang University

Date of oral defence: _____ 2024.05.31

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名:

签字日期:

年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名:

导师签名:

签字日期:

年 月 日

签字日期:

年 月 日

致谢

时光如白驹过隙般，飞逝而过，研究生求学生涯仿佛一部幻灯片在眼前闪过，有过漂洋过海的旅途，有过茫然时的焦虑，也有过不经意间的惊喜。三载之中，太多人给予过我帮助，谨以此文，表达真挚的感谢。

饮水思其源，学成念吾师。特别感谢我的导师司玉林老师三年来的悉心指导，司老师严谨的治学态度和从容的生活方式都深深地影响了我。司老师在科研上总是一丝不苟，把握每一个细节，力求每个过程都能做到完美。司老师对我们因材施教，引导着课题组的每位同学走在自己所热情的科研路上。司老师在项目上总是亲力亲为，参与着每一个环节，耐心地引导着我们前进。司老师在生活上总会关心我们的身心健康，秉承着平衡工作的原则。司老师在我找工作时也给予了很大的帮助，根据我所期望的方向推荐了很多单位。本篇论文全程在司老师的指导下的完成，每一个算法、每一个试验、每一句话、每一个标点符号都倾注着司老师的大量心血。再次衷心地感谢司老师对我的帮助，司老师的指导和教诲将使我受益终身，祝司老师生活顺意、家庭幸福、步步高升。

山水一程，三生有幸。感谢师弟魏浩在我做课题期间的帮助，帮我一起完成了很多试验，共同打造了课题组 Sub-SLAM 的基础。感谢蔡成业师兄在工作上兢兢业业，独挡一面。感谢陈政、胥博、孙吉莉、俞浩、顾阳、杨璟青、王培吉师兄师姐师弟们在科研上的帮助，大家共同营造了课题组良好的科研氛围。感谢一同进入课题组的王懿铭、蒋勇建、贾郁杭、梁琛、余茂宇、蓝天龙，在我的生活上和科研上都给予了很多帮助。感谢同办公室的冯博、王涛、刘小栋、李成龙、徐海洋、柳棣、杨宇轩、夏梅娟、黄鑫、孙志伟、王博涵、胡广迪、江雨萌、赵涛、高明远，一起在浙里度过了难忘的岁月，并肩前行的步伐总是能走得更加稳健。感谢所有的室友们，祝大家都有光明的未来。

谁言寸草心，报得三春晖。家人们永远都是我人生中最坚强的后盾，使我积极地前进，我一定继续努力，不负众望。

感谢浙江大学所有的科研平台，使我翻阅文献时没有障碍。感谢所有的开源工作者，踩在巨人的肩膀上才有此文。感谢 CC98 论坛为我带来了许多惊喜。

最后，祝愿所有关心我和我关心的人都能一帆风顺，前程似锦。

摘要

复杂海洋环境会使海上风电水下结构受到海水侵蚀、海浪冲击、海水冲刷、生物附着等影响，导致结构损伤、阴极缺失或海缆悬空等问题，危害运行安全。利用水下机器人和声光磁技术开展水下结构巡检，对于保障海上风电结构完整性和提升运维效能具有重要意义。目前，海上风电水下结构巡检主要采用声纳成像获取海缆悬空与海底冲刷情况，同时利用水下高清相机拍摄局部结构损伤。然而，声学成像存在分辨率低、纹理缺失和价格高昂等问题，也无法查看表面生物附着情况，而视觉三维重建能够建立包含表面纹理信息的高精度水下三维结构模型，有利于实现海上风电水下结构的精准感知。因此，本文主要围绕海上风电水下结构巡检问题，研究水下视觉三维重建算法与系统，形成水下结构精准感知能力，从而提升海上风电运维水平。

首先，针对水下图像折射畸变问题，提出一种基于成像坐标约束的水下双目相机折射标定算法和水下图像折射复原算法。具体而言，构建了基于光线跨介质折射定律的水下双目相机成像模型，提出了基于棋盘格坐标拟合优化方法的水下相机折射标定算法，提出了基于视差图和折射模型的水下三维点计算和反投影折射复原算法，实现了水下三维点坐标的精确计算和图像折射复原。最后，通过仿真试验对比分析了算法的折射参数计算精度以及稳定性。

其次，设计了基于“双目视觉-惯性-深度”多传感器紧耦合的水下 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 算法。具体而言，通过所设计的共视关键帧和滑动窗口法，融合双目相机、惯性测量单元以及深度计数据，联合计算相机水下位姿。在此基础上，针对已有数据集开展对比试验，其中在水下 Cave 数据集中的完成度达 100%，绝对轨迹均方根误差结果为 0.32 m。结果表明，本文算法与经典 SLAM 算法 ORB-SLAM3、VINS-Fusion 在空气中有相似精度，而在水下场景数据集中有着更好的鲁棒性和更高的精度。

再次，设计了基于截断符号距离函数的水下场景实时三维点云融合算法，以及基于网格优化的离线点云后处理算法。其中，后处理算法包括德劳内三角剖分、表面网格提取、网格细化和纹理贴附。在此基础上，针对 ICL-NUIM 数据集进行三维重建精度测试，计算得到点云坐标平均误差为 0.0074 m，通过对比现有

实时三维重建算法 ROSE-Fusion 和 Bundle-Fusion，证明了本文算法在精度和视觉效果上均有提升。

最后，研制了水下双目视觉三维重建系统，并完成了双目相机标定、图像折射复原和水下三维重建试验验证。在相机标定试验中，本文所提算法坐标计算精度为 98.46%，优于其他对比算法；在折射复原试验中，通过对比所恢复图像与真值图像的像素坐标差，证明本文算法能实现像素级的图像复原，误差为 Pinax 算法的 1/3 左右；水池模型试验结果表明，本文提出的算法可以实现海上风电导管架模型的水下三维重建和精确测量，最大尺寸测量误差为 0.004283 m，相较而言，主流 SLAM 算法均发生跟踪丢失，重建算法 ColMap 和 ROSE-Fusion 计算点云失败，证明了本文三维重建算法在水下场景中的优越性和稳定性。

关键词：海上风电运维，水下三维重建，双目视觉，水下相机标定，同步定位与建图，多传感器数据融合

Abstract

Complex marine environments expose underwater structures of offshore wind turbines to seawater corrosion, wave impacts, scouring, and biological fouling, resulting in structural damage, anode depletion, or suspended power cables, thus compromising operational safety. The use of underwater robots and sonar-optic-magnetic technologies for inspecting these structures is crucial for ensuring the integrity of offshore wind turbines and enhancing maintenance efficacy. Currently, inspections of underwater structures in offshore wind turbines primarily utilize sonar imaging to detect suspended cables and seabed scour, while underwater high-definition cameras are used to capture localized structural damages. However, acoustic imaging suffers from low resolution, lack of texture, and high costs, and fails to reveal surface biofouling. Visual 3D reconstruction, on the other hand, can create high-precision underwater 3D structural models that include surface texture information, facilitating precise perception of the underwater structures. Therefore, this paper focuses on the issue of inspecting underwater structures in offshore wind turbines, studying underwater visual 3D reconstruction algorithms and systems to develop precise perception capabilities, thereby enhancing the maintenance level of offshore wind power.

Firstly, addressing the issue of refraction distortion in underwater images, a calibration algorithm for underwater stereo cameras based on imaging coordinate constraints, and an image refraction restoration algorithm are proposed. Specifically, an underwater stereo camera imaging model based on the laws of refraction across media has been developed, along with a calibration method using chessboard grid coordinate fitting and optimization, and a calculation and back-projection refraction restoration algorithm for underwater 3D points based on disparity maps and refraction models, enabling precise computation of underwater 3D point coordinates and image refraction restoration. Lastly, the accuracy and stability of the refraction parameter calculations were analyzed and compared through simulation experiments.

Secondly, an underwater SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algo-

rithm based on a tightly coupled “stereo vision-inertial-depth” multi-sensor framework was designed. Specifically, by employing designed co-visible keyframes and the sliding window method, data from stereo cameras, inertial measurement units, and depth meters were integrated to jointly calculate the underwater position of the camera. Comparative experiments were conducted on existing datasets, notably achieving a 100% completion rate in the underwater Cave dataset, with an absolute trajectory root-mean-square error of 0.32 m. The results show that the algorithm presented achieves similar accuracy to classical SLAM algorithms such as ORB-SLAM3 and VINS-Fusion in air, but exhibits superior robustness and higher accuracy in underwater environments.

Additionally, a real-time 3D point cloud fusion algorithm for underwater scenes based on truncated signed distance functions, and an offline point cloud post-processing algorithm optimized through meshing, were designed. The post-processing algorithm includes Delaunay triangulation, surface mesh extraction, mesh refinement, and texture mapping. Based on this, a precision test of 3D reconstruction was conducted on the ICL-NUIM dataset, achieving a point cloud coordinate average error of 0.0074 m. By comparing with existing real-time 3D reconstruction algorithms, ROSE-Fusion and Bundle-Fusion, the proposed algorithm demonstrated improvements in both accuracy and visual effects.

Lastly, an underwater stereo vision 3D reconstruction system was developed, and experiments for stereo camera calibration, image refraction restoration, and underwater 3D reconstruction verification were completed. In camera calibration experiments, the algorithm proposed achieved a coordinate calculation accuracy of 98.46%, outperforming other algorithms; in refraction restoration experiments, by comparing the restored image pixel coordinates with the true image, it was demonstrated that the algorithm can achieve pixel-level image restoration, with errors about one-third of those produced by the Pinax algorithm; model pool tests showed that the algorithm proposed could perform underwater 3D reconstruction and precise measurement of offshore wind turbine jacket models, with a maximum size measurement error of 0.004283 m. Compared to mainstream SLAM algorithms, which experienced tracking losses, and reconstruction algorithms like ColMap and ROSE-Fusion, which failed to compute point clouds, this

demonstrates the superiority and stability of the proposed 3D reconstruction algorithm in underwater scenarios.

Keywords: Offshore wind turbines maintenance, Underwater 3D reconstruction, Stereo vision, Underwater camera calibration, Simultaneous localization and mapping, Multi-sensor fusion,

目录

致谢	I
摘要	II
Abstract	IV
目录	VII
图目录	IX
表目录	X
1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外相关研究进展	2
2 AUV 设计	4
2.1 推进器布置	4
2.1.1 推进器的布置形式对机敏性的影响	4
2.1.2 最优化建模	6
2.1.3 最优化求解	6
2.1.4 推力控制向量	7
2.2 机械设计	8
2.2.1 导流外壳设计	8
2.2.2 骨架设计	9
2.2.3 耐压舱体设计	11
2.2.4 浮力材料	11
2.2.5 推进器选型	12
2.2.6 能源模块选型	12
2.3 硬件平台	12
2.3.1 电源与电池管理板设计	13
2.3.2 主控板设计	14
2.3.3 温湿度采集模块设计	16
2.3.4 光照信息采集部分和补光灯部分	17
2.3.5 姿态控制传感器	18

2.3.6 通信板设计	19
2.3.7 电调设计	21
2.4 底层软件设计	21
2.4.1 传感器驱动与数据采集程序	23
2.4.2 执行器驱动	26
2.4.3 底层主控框架与流程	26
3 水下机器人系统建模与仿真	27
3.1 引言	27
3.2 运动学模型和非完整约束	27
3.3 水下机器人动力学模型	33
3.3.1 水下机器人的刚体动力学	34
参考文献	37
作者简介	40

图目录

图 2.1	推进器布置示意图	5
图 2.2	整体结构三维模型	8
图 2.3	导流外壳俯视图	9
图 2.4	骨架俯视图	10
图 2.5	骨架结构示意图	11
图 2.6	控制系统整体结构图	13
图 2.7	主控板原理图	15
图 2.8	主控板 PCB 图	15
图 2.9	DHT11 电路设计与布局	17
图 2.10	DHT11 舱内舱外温度采样电路	17
图 2.11	大功率 LED 驱动 XL6006 照明电路	18
图 2.12	水下照明补光 LED 灯实物图	19
图 2.13	MPU9250 内部框图	20
图 2.14	RS485 电路原理图与 PCB 图	21
图 2.15	深度计初始化及数据读取流程图	24
图 3.1	水下机器人坐标系	27

表目录

表 2.1	水下照明补光 LED 灯参数	18
表 2.2	MS5837 十六进制值与对应的功能	24
表 3.1	水下机器人运动参数定义	34

1 绪论

1.1 研究背景与意义

海洋是地球上最广阔的水域，它覆盖了约 71% 的地球表面。海洋是我们生态系统中至关重要的一部分，它提供了许多重要的资源，包括食物、能源和药物。海洋也是一个丰富多样的生物圈，有着各种海洋生物，如鱼类、海洋哺乳动物、海洋无脊椎动物等。此外，海洋还起着调节气候、循环水分和吸收二氧化碳等重要作用。我国是一个拥有丰富海洋资源的国家，拥有近 14 万公里的海岸线和超过 3000 个海岛，有着丰富的海洋资源，主要包括渔业资源、石油和天然气资源、海洋能源资源、海洋矿产资源等。海洋资源的开发利用的前提是要了解海洋，怎么了解海洋呢？其中海底观测是了解海洋的重要手段之一。由于海底环境陆地环境相比，具有更高的压力、更低的温度和更少的光线。海底环境十分复杂，首先，海底地形十分复杂，有着各种各样的地形地貌，如海底山脉、海沟、海岭等。这些地形不仅影响着海流和海洋生物的分布，也为海洋生物提供了各种栖息地。其次，海底环境中存在着不同的海洋地质和地球化学过程，如海底火山、海底热液喷口等。这些过程会改变海底环境的化学成分和温度，影响着海洋生物的生长和繁衍。再者，海底环境也受到人类活动的影响，如海底油气开采、深海捕捞等。这些活动会对海底生态系统造成破坏，影响着海洋生物的生存。

由于海底环境的复杂性，导致我们海底观测时困难重重，对于我们的技术有着极高的挑战，现有的观测手段，主要有载人潜水器，AUV，ROV 等。载人潜水器观测，对于潜水器的性能要求极高。2023 年 6 月 18 日，由海洋之门营运的泰坦号潜水器在加拿大纽芬兰与拉布拉多省附近的北大西洋失踪。这艘潜水器当时正载著五名游客前往参观沉船残骸，五名人员全部遇难。AUV 的海底观测有限，受限其搭载的传感器和电池容量，需要预先设定路径，无法灵活调整。此外，成本较高，需要大量技术和设备支持。ROV 依赖外部操作、受限机动性、有限的观测能力、高成本和人为干扰。这些限制了 ROV 在某些情况下的应用效果和性能。为了更好的应对海底复杂的环境，浙江大学陈鹰团队设计了适合海底作业的碟形 AUH, 并完成实验，顺利结题。针对复杂受限空间，为了让 AUH 更

好的进行海底作业, 考虑如何让 AUH 运动的更加敏捷是至关重要的。因此, 对于 AUH 敏捷运动能力的提升和敏捷控制算法的改进是十分有必要的。

综上所述, AUH 敏捷运动特性的研究, 对于我国海底观测能力的提升, 对于我国进一步了解海洋, 开发海洋有着重要的意义与应用价值。

1.2 国内外相关研究进展

自从二十世纪五十年代, 世界第一台 AUV 诞生以来, 无数学者就尝试用各种方法来提高 AUV 的性能, 而运动控制作为 AUV 的核心极为重要。为了使 AUV 适应复杂的环境, 越来越多的用来提高 AUV 性能的控制方法应用而生。

为了解决传统的强化学习算法存在参数调节困难和学习效果不稳定的问题, 王潘宇使用了 SAC 算法对 AUV 水平面轨迹跟踪问题进行改进, 采用 SAC 算法并对其进行了改进, 包括设计合理的奖励函数、优化输入的动作空间和状态空间, 并改进经验回放机制, 并通过仿真实验验证了算法的性能^[1]。郑海斌^[2]使用 PID 控制算法和模糊控制算法相结合, 并通过 Simulink 进行仿真验证, 以实现水下机器人的定深定向巡航。张冬梅^[3]用模糊 PID 控制和神经网络滑模控制方法对路径跟踪方案的可行性及效果进行了验证。程健^[4]运用古尔维茨判别法对 AUV 的运动稳定性进行评估, 仿真了 AUV 的直航运动和回转运动, 设计了一种双环积分滑模控制器对 AUV 的位置进行跟踪控制。叶梦佳^[5]采用视线导引跟踪算法和双闭环 PID 控制, 在水平面航迹跟踪和垂直面变深任务中实现了有效的控制。天津大学邓鲁克采用遗传算法 PID 对谁性爱机器人运动姿态进行控制并与 PID 仿真实验进行对比, 得出遗传算法 PID 控制针对水下机器人的控制性能方面有一定提升^[6]。杨睿提出基于水动力模型的鲁棒控制方法, 利用 CFD 水动力模型计算补偿非线性阻尼作用所需的推进扭矩, 并引入 H 鲁棒控制理论解决不确定性问题^[7]。针对康达效应矢量推进器的特性, 李亚鑫^[8]提出一种最优等效补偿控制方法。该方法利用滑模控制器、神经网络和扩张状态观测器, 实时估计和补偿执行器饱和和外界扰动。通过代价函数最小化, 实现推进器矢量力矩耦合特性和抑制欠驱动方向的扰动。使用 Lyapunov 理论证明了方法的稳定性, 并通过仿真实验验证了其轨迹跟踪和鲁棒性。刘璐^[9]针对 AUV 偏航控制系统, 提出了一种鲁棒的分数阶比例积分微分 (FOPID) 控制器设计, 根据鲁棒设计规范针对参数不确定性对其他参数进行优化, 仿真结果说明了所提出的控制算法具有卓越的

鲁棒性和瞬态性能。

Lei 通过引入快速非奇异积分终端滑模控制 (FNITSM) 和自适应技术, 实现速度跟踪误差的局部有限时间收敛和位置跟踪误差的局部指数收敛, 提高现有自适应非奇异积分终端滑模控制方法的收敛速度和效率^[10]。K. Eguchi 使用声学传感器的海底表面估计方法、考虑车辆运动特性的目标轨迹生成方法以及使用推进器和舵的协作运动控制方法实现了 AUV 的低速控制^[11]。Chengcai Wang 建立了基于 ADRC 方法的动态控制器来跟踪参考值, 进行数值模拟来分析编队控制并验证控制框架结果表明多艘 AUV 可以在单线模式和 V 形模式之间切换和维持队形^[12]。Vladimir Filaretov 提出了一种合成控制系统的方法, 该方法能够独立于 AUV 跟随器参数的变化提供所需的控制质量, 实现 AUV 群控系统^[13]。Hector Francisco Ortiz Villasuso 将全局系统与两个单输出系统中的两个输出及其最小阶观察器解, 将最小阶观测器与控制律相结合, 实现 AUV 的深度控制^[14]。Waseem Akram 根据安装在 AUV 上的摄像机拍摄的图像自动生成部署在海底的水下管道的参考路径, 通过向闭环控制系统添加外部干扰验证系统的鲁棒性^[15]。Filaretov Vladimir 提出了 AUV 空间运动控制系统的综合方法^[16], 该方法考虑了自由度、可变或未定义参数之间相互作用的存在。该控制系统由两个回路组成。第一个回路包括一个非线性调节器的组合系统, 当其参数等于标称值时, 该调节器提供 AUV 所需的动态特性, 以及一个具有参考模型的自调节系统, 该系统为未定义或可变部分提供补偿的参数。在这种情况下, 选择自调节控制器的参数以减小不连续信号的可能幅度。第二个回路是非线性位置控制器, 可以考虑速度回路的动态特性和 AUV 的运动学特性为实现水下机器人在前后方向上的悬停控制, 包海默^[17]选择以黑鲈鱼作为仿生对象, 根据胸鳍的结构特点和运动方式, 设计了一种小型水下机器人仿生驱动装置, 通过仿真试验分析, 得出拍动幅度和平均角速度这两个主要因素对该驱动装置的影响, 仿真试验结果表明: 该胸落驱动装置可实现水下机器人在前后方向上的快速悬停。林银福^[18]为了探究 AUV 电机布置方式以及布置位置对 AUV 水动力性能的影响, 利用 CFD 的方法对 AUV 进行流体计算模拟, 为电机的布置形式提供了参考。

2 AUV 设计

2.1 推进器布置

2.1.1 推进器的布置形式对机敏性的影响

水下机器人所使用的推进器有多种类型，每种都有其特点和应用场景。以下是几种常见的推进器类型及其特点：

可旋转方向推进器：这种推进器能够围绕固定的轴（通常是 Z 轴）旋转，从而能够在水下机器人的 $X-Y$ 平面上产生不同方向的推力。这种设计的优势在于灵活性高，能够减少系统的总体能耗，并适应更广泛的任务需求。然而，它的机械结构较为复杂，这也增加了控制系统的设计难度。

固定式推进器：这类推进器的中轴线相对于水下机器人的本体有一个固定的夹角，这意味着一旦安装完毕，其推力方向就确定不变了。固定式推进器简单可靠，虽然由于缺乏旋转能力，它们无法根据任务需求灵活调整推力方向，但是可以通过矢量合成来达到我们所想要的矢量方向。本论文里涉及的推进器就是这种类型。

槽道推进器：这种推进器安装在水下机器人的壳体内部通道中，可以实现正向和反向旋转，从而产生所需的推力。它们通常用于那些对外形设计有特殊要求的水下机器人，比如需要流线型设计以减少阻力的情况。

控制面：类似于飞机上的舵片，水下机器人也可以使用控制面来改变其姿态。这些控制面可以固定在不同位置，以产生升力和阻尼力，帮助机器人进行俯仰和偏航等运动。它们的作用类似于鱼的鳍，能够辅助推进器完成复杂的三维运动。

在我们选择推进器的时候，螺旋桨推进器的叶片有顺时针跟逆时针，这两种推进器成对使用并且对称分布，以便能够抵消推进器工作时产生的扭矩。根据我们需要的水下机器人的自由度，我们确定使用推进器的数量，选择的推进器的数量是要大于或者等于我们需要的水下机器人自由度。例如假如我们想要水系机器人有六个自由度的运动，我们可以选择八个推进器。在确定了推进器的数量之后，我们就要考虑推进器的布置，首先我们确定 $X-Y$ 平面上的推进器布置，我

们以其中的一个推进器布置为例 (如图 2.1 所示), 其余的推进器布置可通过成对和对称来实现。

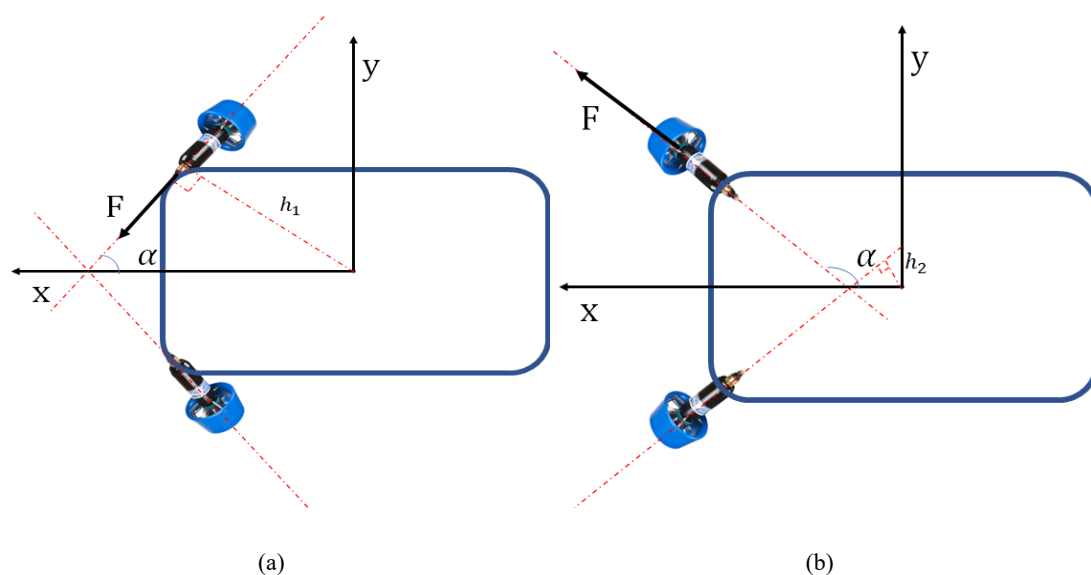


图 2.1 推进器布置示意图

当推进器的推力确定的时候, 我们来确定图 2.1 中, a, b 两种方式的优劣。其中 h_1, h_2 是力到轴 Z 的距离, 有理论力学的基本理论可以得到力对轴的矩的大小关系:

$$F * h_1 > F * h_2 \quad (2-1)$$

力对轴的矩是产生旋转的原因, 因此力对轴的矩的大小, 跟水下机器人偏航运动的敏捷密切相关, 力对轴的矩越大, 旋转的角加速度会越大, 机器人运动更加迅捷。总的来说, a 布局与 b 相比主要有以下几点优点:

1. 推进器的性能有限, 意味着当推力达到极致时, a 布局方式会产生更大的角加速度, 使得水下机器人运动更加的迅速。
2. 当我们想要水下机器人以固定角加速度进行偏航运动时, 意味着使用更小的推力就可以达到我们需要的角加速度, 这使得推进器消耗的能量更小, 使得水下机器人续航更长。
3. 推进器在推力的范围内, 能控制的角加速度范围变大, 意味着控制更加敏捷, 对水下机器人的控制量更加敏捷。

2.1.2 最优化建模

确定了布局方式之后，我们就要确定图 2.1 中， a 布局方式中 α 的大小。确定 α 要考虑的因素，首先 $\mathbf{X-Y}$ 平面的推进器跟水下机器人三个方向的自由度有关，分别是纵荡、横荡、偏航。估计三个方向上水下机器人在每次任务上行走距离的占比或者运动时间的占比。因为我们主要是设计出机敏性更强的水下机器人，我们还需要重点考虑三个方向上的加速能力，即加速度。根据这些因素我们可以通过最优化求解的方式来求的最优的 α 。设我们想要的三个方向的占比分别为 $a:b:c$ ，其中 $a+b+c=1$ 。那么我们根据几何关系可以得到关于 α 的函数解析式：

$$f(\alpha) = aF\cos(\alpha) + bF\sin(\alpha) + cFh_1 \quad (2-2)$$

$$h_1 = L\sin(\alpha) - W\cos(\alpha) \quad (2-3)$$

其中， α 为力 F 与 X 轴的夹角，如图 2.1 中 (a) 所示； L 是力作用点到 Y 轴的距离， W 是力的作用点到 X 轴的距离。

对问题进行建模，并转化为标准形式可以得到：

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} J &= -f(\alpha) \\ s.t. \left\{ \begin{array}{l} F\cos(\alpha) - m\alpha_x \geq 0 \\ F\sin(\alpha) - m\alpha_y \geq 0 \\ Fh_1 - I\alpha_z \geq 0 \\ \alpha \geq 0 \\ \frac{\pi}{2} - \alpha \geq 0 \\ F - F_{min} \geq 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中 α_x, α_y 和 α_z 分别是 X, Y 方向的最小加速度与绕 Z 轴的最低角加速度， F_{min} 是水下机器人工作的最小推力。

2.1.3 最优化求解

暂定 SQP, C++, QT 做一个交互界面。

2.1.4 推力控制向量

一般情况下，我们设计好推机器布置之后，就要根据我们的需求进行推力分配，传统的推力分配，是通过先求每个自由度方向所需的力或力矩，然后通过求解布置矩阵的伪逆矩阵来求解每个推进器上应该输出的推力。然而，对于每个控制问题而言，并不是每个推进器都是最佳的选择，例如当我们控制水下机器人水平前行的时候，并不需要垂直推进器的作用。有时候我们又需要根据水下机器人的功能，来去修改推进器的布置形式，这个时候计算的布置矩阵就会因为某个推进器的整体变化而受到影响。特别的，当水下机器人执行任务的过程中，出现某个推进器损坏或者不工作的情况时，如若改变推进器的布置矩阵，这将不利于系统的稳定。然而通过控制向量的方式对推进器进行增删操作，并不会对系统的布置矩阵产生影响，有利于系统的稳定，极大的提高了水下机器人在水中遇到突发情况时的机敏性。推力控制向量如式 2-5 所示：

$$\beta_i = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

其中, i 表示第 i 个推进器。 f_1 表示推进器的纵荡系数， f_2 表示推进器的横荡系数， f_3 表示推进器的垂荡系数， f_4 表示推进器的横滚荡系数， f_5 表示推进器的俯仰系数， f_6 表示推进器的偏航系数。系数的确定可以根据具体情况具体分析选取，主要考虑每个推进器的安装形式对水下机器人水下运动的力学影响以及使用的控制方法来确定。例如当使用 PID 进行控制的时候，因为 PID 的控制系数我们可以根据实际进行调节，结合推进器安装位置对水下机器人运动的力学影响，因此就可以从 1, 0, -1 当中进行选择。所以推进器控制向量模型可以写成如式 2-6 所示：

$$T = \beta \Delta \quad (2-6)$$

其中， $T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n]^T$; $\beta = [\beta_1 \ \beta_2 \ \dots \ \beta_n]^T$; $\Delta = [\Delta_x \ \Delta_y \ \Delta_z \ \Delta_\varphi \ \Delta_\theta \ \Delta_\psi]^T$; T_n 是第 n 个推进器需要分配的推力， Δ 是六个自由度方向上各自需要的力或力矩。写出

推力控制向量模型之后,就可以使用推力控制向量来进行水下机器人的推力控制了。

2.2 机械设计

机械结构作为整个机体的基础部分,对水下机器人的机敏性能的影响极为显著,其主要功能为:

1. 能够为机体在陆地放置及水下航行提供支撑;
2. 能够保证机体初始在水中保持接近零浮力;
3. 能够保护内部组件下潜 100m。

用 SOLIDWORKS 软件对水下机器人结构进行设计和建模,并进行受力分析及干涉检查,以符合要求。同时对水下机器人整体的质量和体积进行计算,确定机身配重的重量,使机器人可在水中保持浮力平衡。整体结构三维模型如图 2.2 所示,整个水下机器人的结构采用 HDPE 材料,上面的黄色部分是光敏树脂 3D 打印的,密封舱为亚克力材料。

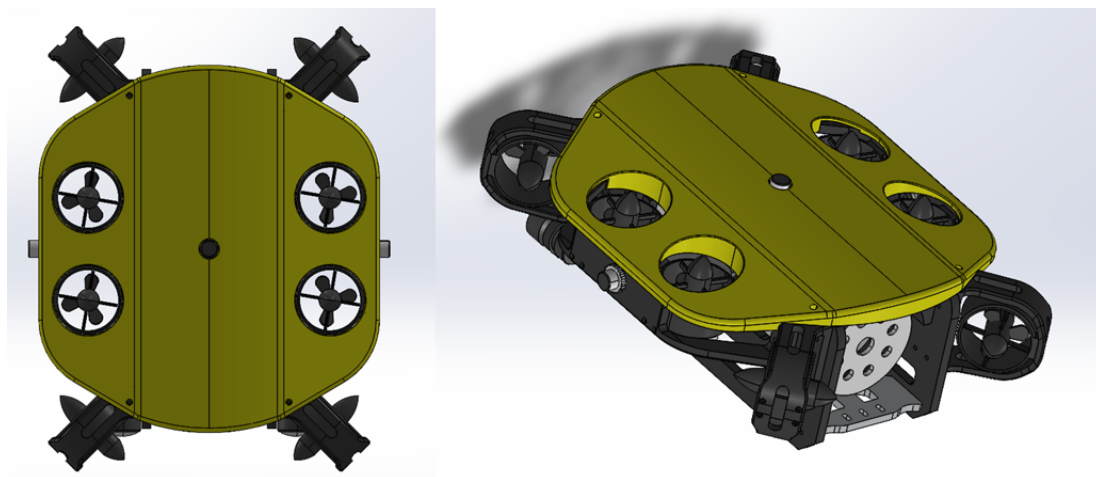


图 2.2 整体结构三维模型

2.2.1 导流外壳设计

导流外壳大致形状为乌龟盖形状的薄外壳,主要用于保护水下机器人内部设备免于海洋环境中的水流以及各种杂物的冲击破坏,同时为整机提供一个水动

力性能较为优秀的外形、减少运行过程中的流体阻力从而降低功耗。如图 2.3 所示，包括如下主要结构：

1. 垂直流道：图 2.3 中标志 1 所示位置，流道沿水流方向截面为圆形，垂直推进器推动水流通过该流道为整机提供一对垂直方向推进力。
2. 中央通孔：图 2.3 中标志 2 所示位置，上侧外壳通孔较小，主要用于方便后续改进水下机器人，例如可以用于日后水声通信装置的声头伸出从而充分与水体接触，以及用于水面定位通讯用短波天线和 GPS 天线伸出。
3. 定位孔：图 2.3 中标志 3 所示位置，用于导流壳的定位与固定。

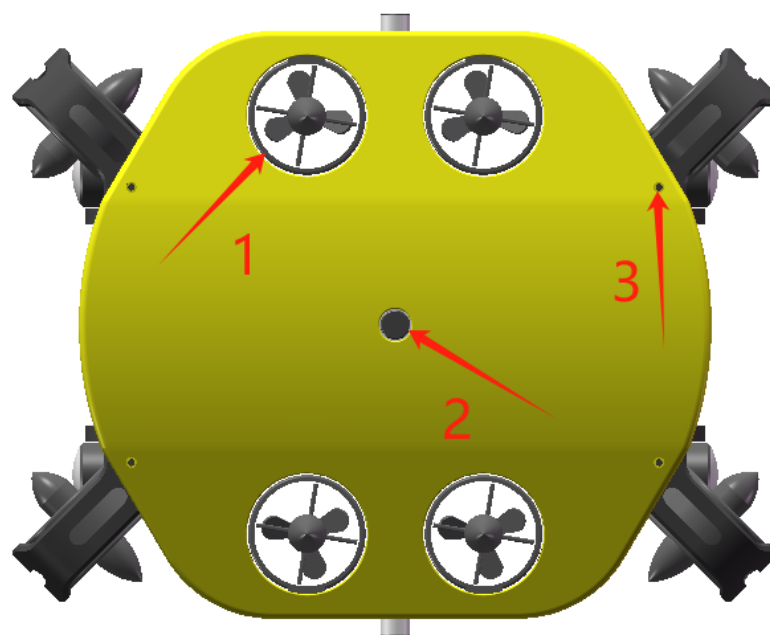


图 2.3 导流外壳俯视图

2.2.2 骨架设计

骨架是水下机器人内部各耐压舱体、推进器、传感器等部分的承载和固定的重要结构。在空气中，其需要有足够的强度支撑整个水下机器人结构，在水中其需要足够的强度连接各结构，在水下机器人进行机动时，可以提供足够的力使各部件紧密结合在一起克服惯性力和流体阻力保持整体运动。

其俯视图如图 2.4 和整体骨架示意图如图 2.5 所示。为了在拥有足够强度的前提下减轻重量、方便制造、组装和运输，采用 3D 打印的零部件组装而成，具体代表性零部件说明如下：

1. 耐压舱固定板：图 2.4 中标志 1 所示位置，是一块 3D 打印的用于放置圆柱形水密控制舱的塑料件，厚度为 8mm，上面的孔洞分别用于固定控制舱以及固定上部支撑架。
2. 圆柱耐压仓固定箍：图 2.4 中标志 2 所示位置，直径为 120mm，用于耐压舱体的固定以及内层骨架与外层骨架，内层骨架与中央板之间的连接。
3. 防撞框架：图 2.4 中标志 3 所示位置，主要作用是在机器人受到撞击时，更好的保护密封舱，同时负责作为垂直螺旋桨的固定支架。
4. 垂直框架：图 2.4 中标志 4 所示位置，用于连接防撞框架，推进器框架，同时连接耐压舱固定板，构成中间框架主体。
5. 螺旋桨固定架：图 2.4 中标志 5 所示位置，通过螺栓紧固加紧螺旋桨。

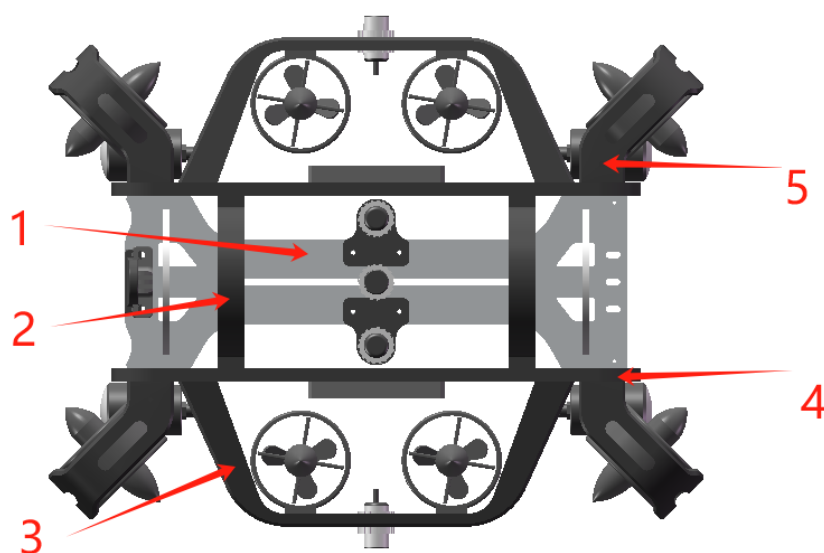


图 2.4 骨架俯视图

下面写一个强度校核。

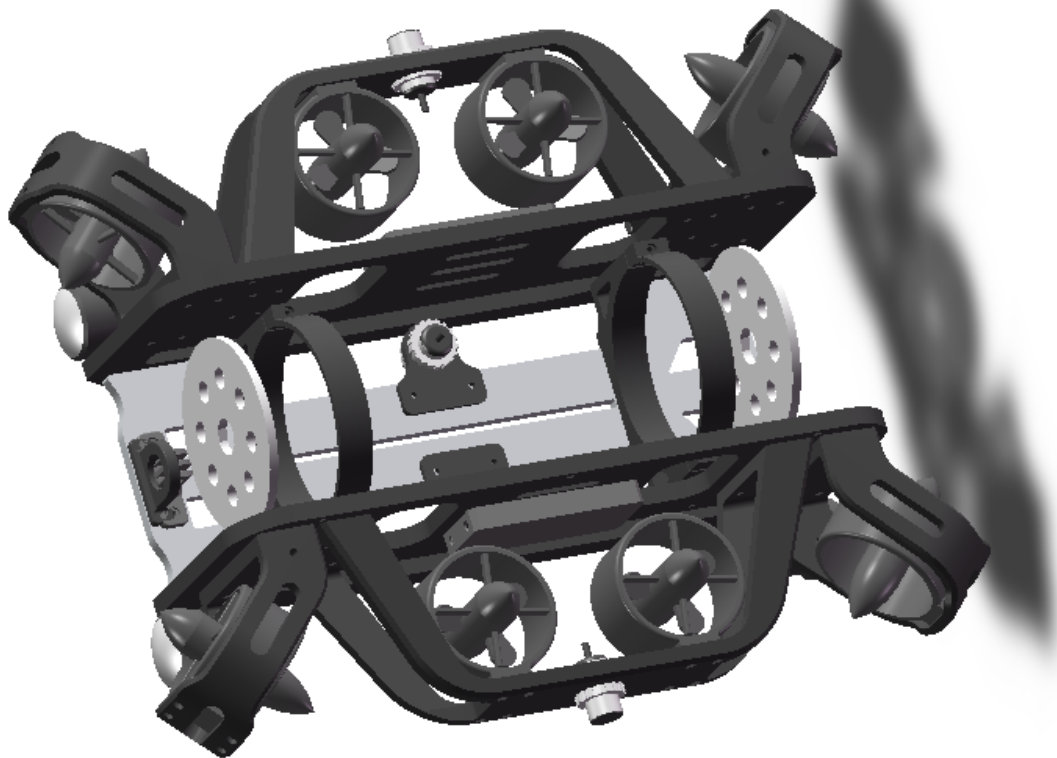


图 2.5 骨架结构示意图

2.2.3 耐压舱体设计

耐压舱体主要为电池、控制系统硬件等设备提供保护，其要求能承受 100m 设计深度下的压力且保持水密特性。由于整机的技术指标要求潜航深度 100m，计算深度取技术指标的 1.5 倍为 150m，即耐压筒的计算压力。 $p_c = 1.5MPa$ 。根据国家标准 GB150.1 – 150.4 – 2011《压力容器》对大型圆柱形耐压舱体进行设计计算。

2.2.4 浮力材料

浮力材料用于弥补机体在水中的负浮力，根据整机设计质量与排水量估算进行选型与大致布局安装。采用 BMTI 浮力材料，其相对密度为 0.4。共需不超过 1kg。

2.2.5 推进器选型

推进器是水下机器人在水平运动、姿态维持、定点着底工作中最重要的动力源。水下机器人中使用了四个水平的推进器和四个垂直推进器，其中水平推进器负责提供水平运动的推进力，通过差速实现机体的零回转半径旋转等水平机动；垂直推进器提供垂直方向推进力，用于维持直升机运动时的机体姿态，保持水平运动攻角，为小范围垂直运动提供驱动力。

2.2.6 能源模块选型

整机能源供给使用大容量锂离子电池，电池主要为推进器、控制电路以及照明装置供电。

写一个电量核算跟电池选型。

2.3 硬件平台

水下机器人硬件控制部分采用 STM32F411 微控制器控制整个系统，此处仅对系统功能模块进行规划。供电方面，使用 6 串 3 并共 18 节 4.2V 锂电池串联构成 13V 直流电源给需要的模块供电，同时将电池电压通过开关降压芯片降压到 5V，再将 5V 电压通过线性降压芯片降压到 3.3V 供控制系统使用，这样可以兼顾到低功耗并且减少开关电源对模拟电路的影响。水下推进器的驱动是通过 MCU 输出 PWM 波控制电调进而控制其和转动方向和速度，所以 MCU 需要输出 8 路 PWM 对 8 个推进器进行调速。使用 MPU9250 九轴陀螺仪及时获取姿态信息用于控制水下机器人的姿态，同时使用 MS5837 压力传感器获得机器人深度数据，用于控制机器人运动深度，MCU 需留出 IIC 接口和 MPU9250 以及 MS5837 进行通信。另外还要获取水下相关信息并上传到电脑端，使用光电二极管获取光照强度信息，MCU 感知的光照信息，输出 PWM 波控制补光灯的亮度；整体结构如图 2.6 所示。

此硬件系统不仅需要满足水下机器人正常工作的要求，还要满足易于日后拓展的功能，硬件软件所有功能设计应该围绕海洋生物识别的需求展开。硬件设计方面围绕电源供电、主控、信息采集、信息传输、自动补光、异常报警等需求进行设计。供电方面，生物识别设备和水下机器人使用同一个电源，需将电池电压

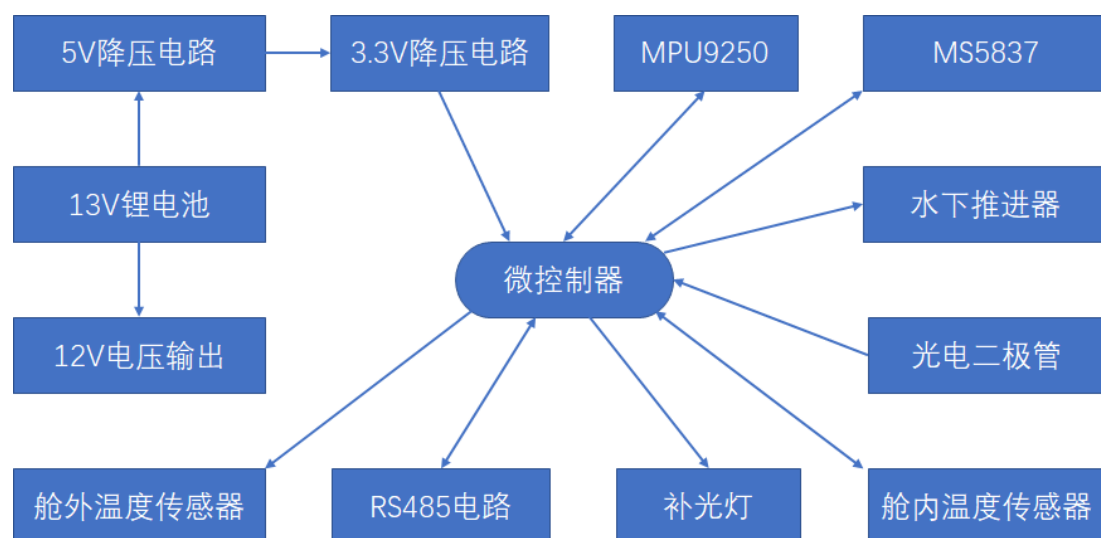


图 2.6 控制系统整体结构图

转化为各个模块所需的电压值；设计主控的最小系统保证主控芯片正常工作；使用温度传感器、湿度传感器、MPU9250、MS5837、光敏二极管、漏水检测传感器等进行信息采集；使用 SP3485 芯片对信息传输电平进行转换；使用补光灯自动进行补光操作。硬件控制板设计好后置于水下机器人密封舱内，硬件功能满足的前提下，对硬件功能模块的原理设计方面没有特殊要求，只要密封舱的密封效果较好即可，但是对硬件控制电路的 PCB 设计要求比较高，一方面要考虑水下机器人内的空间大小，注意舱内空间对硬件控制电路板的尺寸限制，另一方面要保证硬件功能正常的前提下考虑 PCB 的接口位置合理性和整体的美观性等。

2.3.1 电源与电池管理板设计

根据项目需求和功能控制电路要求，控制电路需要使用 DC5V 电源、DC3.3V 电源，水下推进器需要使用 DC12V 18V 电源，并且还需 STM32 等芯片使用的要有 12V 的 DC 电压输出，本设计使用的是标 13V 的锂电池，需要将电池的电压进行电压转换到各模块正常工作时的对应电压。

考虑到水下机器人使用的是锂电池供电，需要考虑到电量消耗，提高电源利用率，减少发热，同时考虑到主控芯片对电源纹波的要求，电源方案设计方案如下：使用开关电源降压芯片 MP2359 将 13V 电压降为 12V 和 5V，然后是用线性电源 AMS1117 芯片将 5V 降压为 3.3V，经过各部分正常工作电流大小估计和芯片额定参数，电源部分具体方案为使用 LM2576R-12 将锂电池的 13V 电压降压为 12V 电压输出、使用 MP23 59DJ-LF-Z 将锂电池的 13V 电压降为 5V 电压供

电、之后使用线性降压芯片 LM1117-3.3 将 DCSV 电压转为 DC3.3V。在电池组的输入输出端，有 BMS 电池管理模块。

2.3.2 主控板设计

控制板主要为 STM32F411CEU6 及其外围传感器、驱动电路、降压电路、网络通信端口等设计，用于获取水下机器人的水下运动姿态与深度，并通过控制算法进行自稳定、定深度、GPS 巡航等功能的实现，同时与上位机进行数据交换与通信，是最重要的底层硬件。目前水下机器人控制系统至少需要 8 路 PWM 输出、2 路 ADC 采集、一个串口调试下载接口、一个 SWD 下载接口、一个串口收发接口 (用于 RS485 收发收据)、若干 IO 口；水下机器人目前处于样机试验研究阶段，后期会增加功能和优化功能，必须保证主控的功能兼容性所以选用 STM32F411CEU6 作为主控芯片，STM32F411CEU6 是 F4 系列大容量增强型产品，外设丰富，引脚更是高达 48 个，STM32 由于其价格合理、外设丰富、功耗较低并且具有强大的软件生态支持等优点，得到了广大开发者的认可，ST 公司也因此积累了大量的用户。STM32F411CEU6 工作频率可以通过时钟源倍频到 100MHz，并且内置 512k 字节的闪存和 64K 字节的 SRAM，两条 APB 总线的外设上连接着多个高速 I/O 端口。最小系统电路是主控正常工作的前提，最小系统包括供电、复位、滤波、时钟等电路，STM32 有两个控制芯片启动方式的管脚 BOOT0 和 BOOT1，当 BOOT0 接地时，正常启动；当 BOOT0 接 3.3V,BOOT1 接地时，STM32 从系统存储器启动，BOOT0,BOOT1 均接 3.3V 时，STM32 从 SRAM 启动。本设计中主控制器的 BOOT 连接方式是 BOOT0 和 BOOT1 均接地，复位后让 STM32 正常启动。

硬件复位电路的作用是为了能通过外部按键将系统从某种状态直接执进行硬复位，按下按键后 STM32 的 RESET 引脚由高电平变为低电平触发系统复位。时钟对于 STM32 重要性就如脉搏对于人体，稳定的时钟是芯片工作的前提，本设计中通过 STM32 的 OSCIN 和 OSCOUT 引脚外接 8MHz 石英晶振给系统提供时钟，系统使用此时钟通过倍频和分频给各部分提供时钟。主控板原理图如图 2.7 所示，主控板 PCB 图如图 2.8 所示。

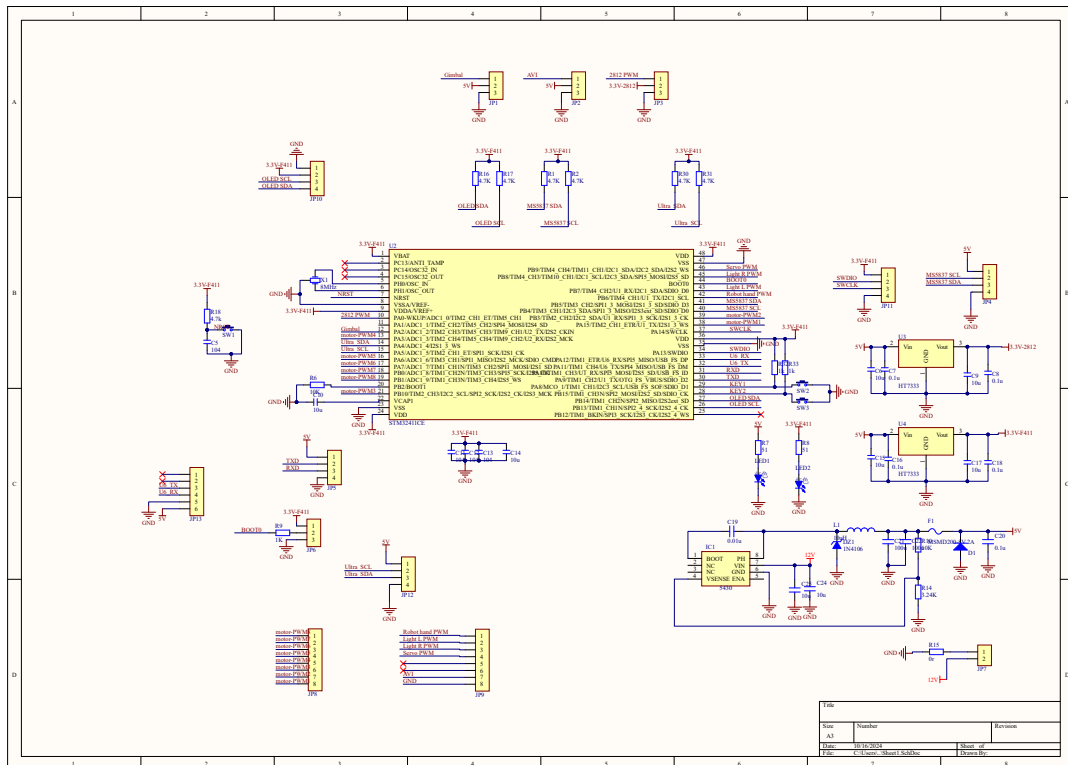


图 2.7 主控板原理图

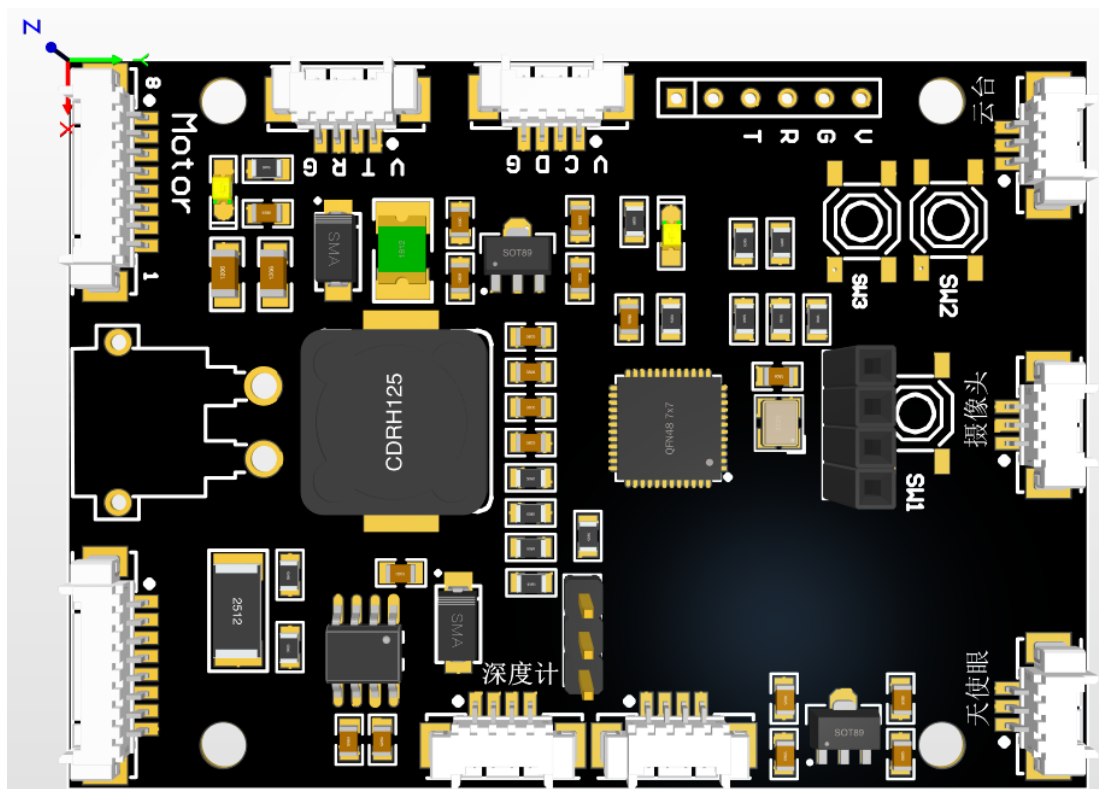


图 2.8 主控板 PCB 图

2.3.3 温湿度采集模块设计

湿度和温度是水下机器人工作时需要重点监测的信息，湿度采集是指采集水下机器人密闭舱中的湿度信息，DHT11 用于检测舱内湿度，由于在实验过程中频繁地开关密封舱，会导致舱内湿度比空气中的湿度高，舱内电路不适宜在湿度过高的环境下工作，长时间在湿度过高的环境下工作可能导致线路短路或者焊点加速氧化，而温度采集包含舱外温度数据采集和舱内温度采集，舱内设备在工作时会产生较多的热量，当舱内温度过高，则密封舱内处于相对不稳定的状态，舱内的湿度和温度过高都应该让水下机器人停止工作，经处理状态正常后再工作。DHT11 温湿度传感器是一个单总线控制的传感器，也就是说使用一个 IO 口就可以控制 DHT11，可通过该 IO 口将温度和湿度信息读出。为保证数据的准确性，DHT11 传输的数据都有 1 Byte 数据用于校验。它的温度测量范围为。0~50 摄氏度，误差达 2 摄氏度，无法测量零度以下温度，湿度测量范围为 20%~90%，湿度测量精度为正负 5%，很明显，DHT11 温度测量精度不如价格更便宜的 DS18B20，所以舱内外温度测量均使用是 DS18B20，DHT11 仅用于测量湿度。

DHT 11 的传输时序对于编写 DHT11 驱动程序是至关重要的，主机将总线拉低并保持 18ms 以上为开始信号，再将总线拉高 20~40us，然后等待 DHT11 的响应，在传输数据过程中 DHT11 再将总线拉低 12~14us 之后将总线拉高 26~28us 表示传输数字“0”，如果拉低 12~14us 后拉高 116~118us 则表示传输数字“1”。DHT11 输出的数据包一共包含 40 个 bit 共 5Byte，传输时高位先出，5Byte 数据的意义分别为:byte4,byte3 为湿度数据，byte2,byte1 为温度数据、byte0 为用于校验的校验和，byte2,byte1,byte3,byte4 相加的和 byte0 相等，则代表数据读取正常。DHT11 电路设计与布局如图 2.9 所示。

DS18B20 相对于常用的热敏电阻体积更小、适用电压更宽、不需要复杂的外围硬件电路，和 DHT11 一样只需要一个微控制器的 IO 口便可以读出温度值，而使用传统的热敏电阻测量温度需要更多的外围电路，无形中增加了测量的器件成本和设计成本，也不利于节约 PCB 板面面积，可能还要将模拟的电流或者电压处理后变成主控能识别的数字量。DS18B20 的测量温度范围广精度高，多种封装方式可满足多种场景需求，本设计舱内温度传感器使用直插式封装，舱外温度传感器使用的是 DS18B20 是可以水下测量的封装。其读写方式和 DHT11 类

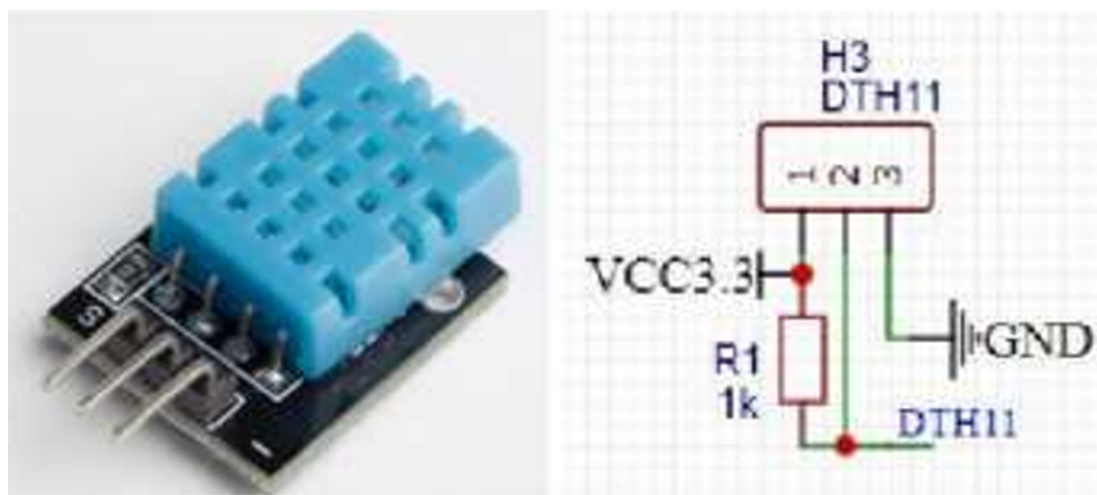


图 2.9 DHT11 电路设计与布局

似，在此不做赘述。舱内舱外温度采样电路如图 2.10所示。



图 2.10 DHT11 舱内舱外温度采样电路

2.3.4 光照信息采集部分和补光灯部分

当水下光照条件不好的情况下，水下机器人搭载的图像处理设备获取的照片和视频成像质量会下降，直接影响图像识别的效率和效果。当水下光照度下降一定值时，获取的图像将无法被识别，所以需要光照传感器获取水下光照强度并将信息传输到主控板，主控板接收到光照信息后控制水下补光灯的工作，以满足摄像机成像所需光照要求。

表 2.1 水下照明补光 LED 灯参数

属性	特性
防水深度	小于或等于 200 米
外壳材质	铝合金硬质氧化
亮度	1500 流明
色温	6500K
供电	12 ~ 36 伏特
控制接口	PWM
重量	空气中 165 克, 水下 125 克
线长	1 米
功率	15 瓦

补光灯使用 PWM 控制的铝合金硬质深水防水高亮度 LED 灯, 该补光灯专为水下环境设计, 额定功率 15W, 色温 6500K, 亮度 1500 流明, 非常适合水下成像补光, STM32F411CEU6 通过 PF8 引脚采集光照接收部分的电压值, 补光灯的亮度调节可根据采集到的光照量化值, 在对应引脚上输出合适的 PWM 波形来实现调节补光灯的光照强度。大功率 LED 驱动 XL6006 照明电路如图 2.11 所示。水下照明补光 LED 灯参数如表 2.1 所示, 实物图如图 2.12 所示。

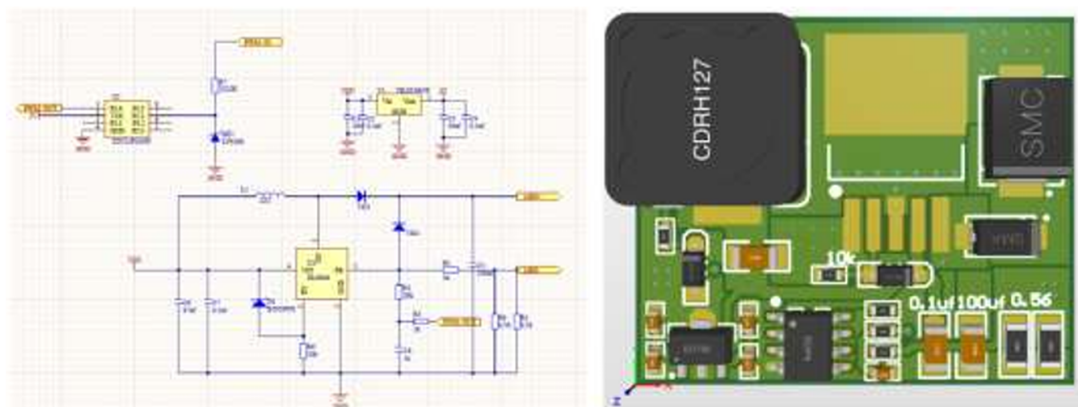


图 2.11 大功率 LED 驱动 XL6006 照明电路

2.3.5 姿态控制传感器

水下机器人在水下运动时通过控制板对水下推进器的控制, 要准确地感知水下机器人的运动姿态, 并根据其姿态信息及时做出反应, 必须使用姿态感知传感器实时获取水下机器人姿态, 姿态感知传感器使用 MPU9250 九轴传感器。和其



图 2.12 水下照明补光 LED 灯实物图

他解决方案相比，MPU9250 更小的功耗、更小的封装、更准确的传感、更少的组件、更好控制的接口以及更便宜的价格使得 MPU9250 得到越来越多的工程师的青睐。

MPU9250 能通过 IIC 接口以数字的形式输出旋转矩阵、四元数、欧拉角格式的融合验算数据，自带 1024 字节 FIFO，降低了系统处理数据的功耗，数据读取更快更便捷，超小尺寸 QFN 封装，简洁的外围硬件电路，大大节省了硬件板面面积。我们能清晰看到 MPU9250 几个重要的引脚，MCU 通过可以 SCL 和 SDA 两个引脚来控制 MPU9250。从框图中可看到，实际上 MPU9250 是通过 7 路 ADC 采集的方式，将重力加速度、姿态角、温度的信息转换为电路能识别的电信号，通过数据调节后将数据存到相应的寄存器中，MCU 对 MPU9250 内部数据寄存器的读操作可读出姿态数据，对 MPU9250 的配置寄存器读写可以设置工作状态和实时获取运动器姿态信息。其内部框图如图 2.13 所示。

2.3.6 通信板设计

采用 2.4G 频率发射接收模块和 5.8G 频率发射接收模块，分别发射接收控制信号和图像，采用无刷电机驱动板和 stm32 最小系统板。RS-485 总线标准规定利用两根传输线间的电压差的方式来区分传输信息的逻辑，外部干扰对两根差分线中传输数据的影响可以近似认为是相同，在接受端识别逻辑的方式是两个

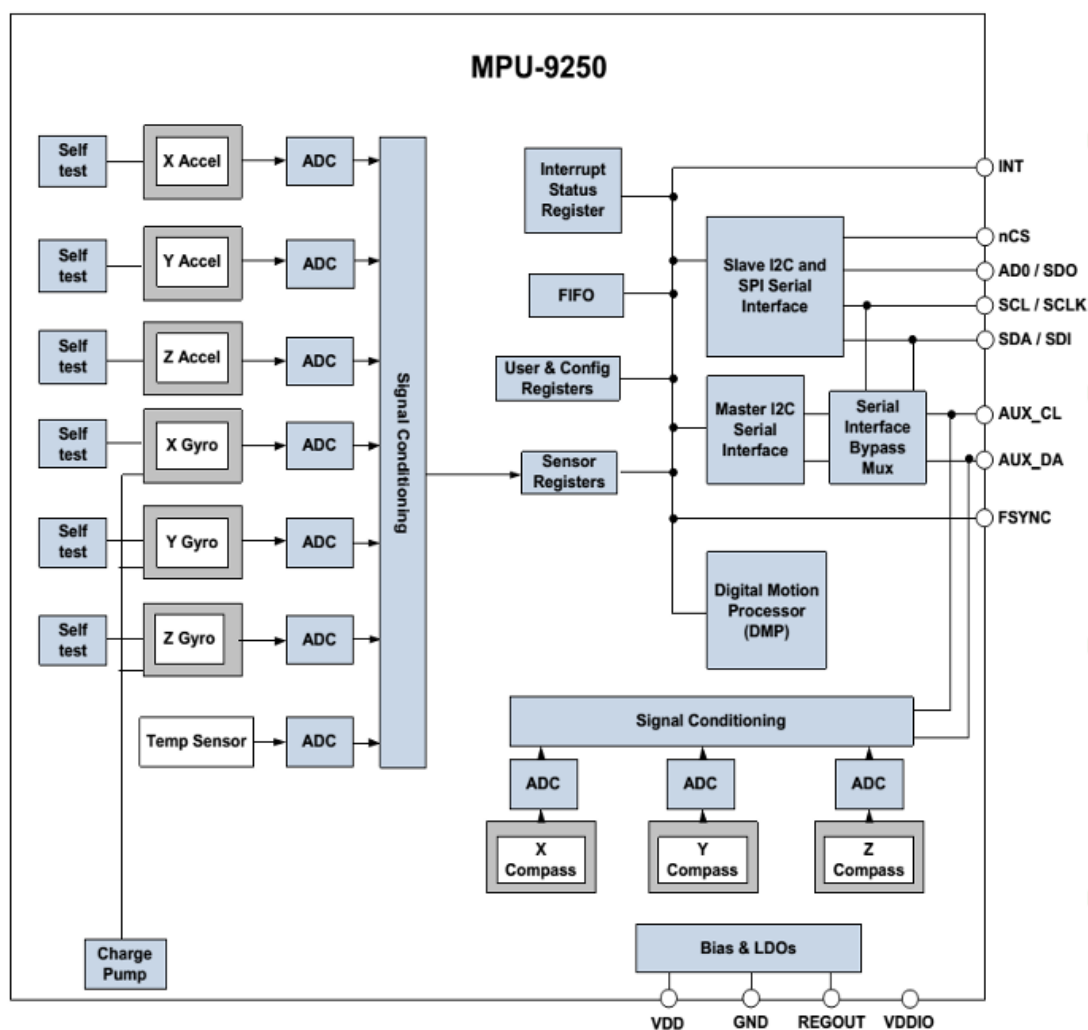


图 2.13 MPU9250 内部框图

传输线上的电压做减法，因此传输逻辑基本不受影响，这种差分传输形式的能有效抑制了大部分类型的干扰，被广泛用于工业控制自动化等复杂场景，其特点如下：

- 采用差分传输方式，传输抗干扰能力强。
- 数据最高传输速率可以达到 10Mbps。
- 理论最多可连接一百多个设备，便于设备组网通信。
- 理论最大传输距离大约 3000 米。

RS485 电路原理图与 PCB 图如图 2.14 所示。

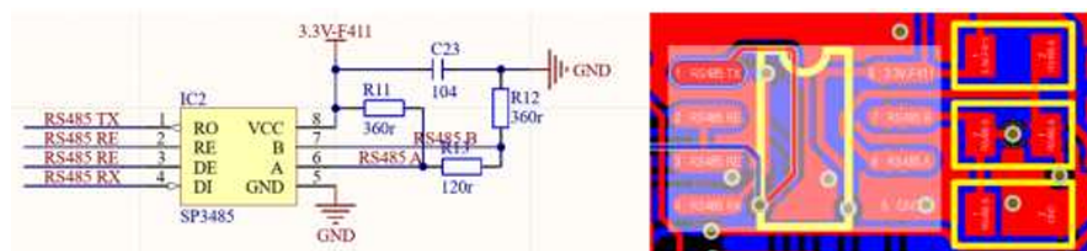


图 2.14 RS485 电路原理图与 PCB 图

2.3.7 电调设计

先放着决定要不要写，看看有没有原图。

2.4 底层软件设计

底层嵌入式软件的设计主要是基于2.3.2节中的底层主控板设计来实现的。主要包括传感器设备例如九轴姿态传感器的初始化以及通信协议，中断控制逻辑、基本的定时器、PWM 控制水下推进器等内容。软件的编写主要使用的是 C 语言，开发软件使用的是 Keil uVision 5。

Keil uVision 5 是一款由 ARM Keil 开发的专业集成开发环境 (IDE)，主要用于基于 ARM Cortex-M 微控制器的程序开发。它提供了一个完整的 IDE，支持从编写源代码到编译、链接以及最终调试整个开发流程。编辑器具备语法高亮、代码折叠、自动补全等功能，提高编码效率。编译器内置了高效的 ARM 编译器，能够将 C/C++ 代码编译成优化后的机器码。调试器支持硬件断点、查看变量值、单步执行、修改内存等调试功能。可以与目标硬件上的调试硬件 (如 J-Link 或 SWD) 通信，进行非侵入式的实时调试。在项目管理方面，它支持创建和管理多个工程文件，每个工程文件可以包含多个源文件和对象文件同时提供了多种视图，如 Project Explorer、Symbol Browser、Call Graph 等，便于开发者浏览项目结构、函数调用关系等。此外，它可以与第三方工具和服务集成，扩展开发环境的功能，支持多种 ARM Cortex-M 系列微控制器，并且与之前的 Keil MDK 版本兼容，允许用户平滑过渡到新版本。总的来说，它集成了项目管理、代码编辑、编译、调试等多种功能于一体，使得开发者可以更加高效地进行嵌入式系统的开发工作，可以更快速地开发稳定可靠的嵌入式软件。

软件采用 FreeRTOS(Free Real-Time Operating System) 操作系统。FreeRTOS

是一款广受赞誉的实时操作系统 (RTOS)，专为嵌入式系统设计。自 2003 年由 Richard Barry 首次发布以来，FreeRTOS 已经成为嵌入式开发者的首选操作系统之一。2018 年，FreeRTOS 被亚马逊收购，并更名为 AWS FreeRTOS，进一步增强了其在物联网 (IoT) 领域的应用能力。其特点如下：

- FreeRTOS 的一大特色在于它是完全免费且开源的，遵循 MIT 许可证，任何人都可以自由下载、使用、修改和分发 FreeRTOS 的源代码，无需支付任何费用。这对于预算有限的个人开发者来说极具吸引力，因为它降低了嵌入式项目的初始成本。
- FreeRTOS 设计的极其轻巧，其核心代码量极小，通常不超过几千行。这样的设计使得 FreeRTOS 能够在资源极其有限的微控制器上运行，例如仅有几 KB RAM 和几十 KB ROM 的设备。这一点对于需要实时响应并且硬件资源受限的嵌入式应用至关重要。
- FreeRTOS 采用了模块化的设计思路，允许开发者根据实际需求选择需要的功能模块。用户可以根据自己的应用环境来裁剪 FreeRTOS，移除不必要的组件，从而进一步减少内存占用。这种灵活性使得 FreeRTOS 成为广泛应用于不同领域的理想选择。
- 作为一款实时操作系统，FreeRTOS 提供了确定性的响应时间。它采用了优先级调度算法来管理任务 (thread)，确保高优先级的任务能够在低优先级任务之前获得执行的机会。这种机制使得 FreeRTOS 能够快速响应外部事件，非常适合那些需要实时处理输入输出数据的应用场合。
- 在 FreeRTOS 中，任务是最基本的执行单元。开发者可以创建多个任务，并为每个任务赋予不同的优先级。此外，FreeRTOS 还提供了一系列任务间通信和同步机制，如信号量 (semaphore)、消息队列 (message queue)、互斥锁 (mutex) 等。这些机制帮助开发者实现任务间的协同工作，确保数据的一致性和完整性。
- 尽管 FreeRTOS 本身并不提供复杂的内存管理功能，但它允许开发者使用自定义的内存管理方案。FreeRTOS 支持动态内存分配，但也鼓励开发者使用静态内存分配来避免内存碎片问题，提高系统的稳定性和响应速度。

- FreeRTOS 对中断处理给予了特别的关注，支持在中断服务程序 (ISR) 中执行快速响应操作。中断服务程序可以使用信号量等手段与普通任务进行通信，从而实现在中断发生时的高效处理。
- FreeRTOS 可以运行在多种不同的微控制器架构上，包括但不限于 ARM Cortex-M、RISC-V、MIPS 等。这种广泛的硬件兼容性使得 FreeRTOS 成为跨平台开发的理想选择，开发者可以在不同的硬件平台上复用相同的软件代码。
- FreeRTOS 还拥有一个庞大而活跃的开发社区，成员们积极贡献代码、分享经验，并提供技术支持。此外，FreeRTOS 官方还提供了详细的文档和教程，帮助新手快速上手。对于那些寻求商业支持的企业用户，市面上也有不少第三方服务商提供基于 FreeRTOS 的技术支持和服务。

基于 FreeRTOS 的诸多优点，FreeRTOS 已经广泛应用于多个领域，包括但不限于工业自动化、智能家居、医疗设备、汽车电子、消费电子产品等领域。随着物联网技术的快速发展，FreeRTOS 的应用范围还将进一步扩大。Amazon 收购 FreeRTOS 后，增加了对物联网的支持，使其能够更好地与其他云服务集成。未来，FreeRTOS 有望在连接嵌入式设备与云端服务方面发挥更大作用，推动嵌入式系统向智能化方向发展。

2.4.1 传感器驱动与数据采集程序

深度传感器的型号是 MS5837-30BA，采用 IIC 通信，内部有一个 112 位的 PROM，用于补偿工艺和温度变化所必需的六个系数经过计算存储存在这里。主控板通过输入串行时钟 (SCL) 和串行数据 (SDA) 对数据进行时间记录。该传感器在同一引脚 SDA 上响应，该引脚 SDA 对于 IIC 总线接口是双向的，因此该类型接口仅使用两根信号线，不需要片选。通过 IIC 通信，主控板对其进行复位等操作。每条 IIC 通信消息以启动条件开始，以停止条件结束。MS5837-30BA 地址是 1110110x，其中 x 代表 0 或 1，当 x 为 0 时，代表的时写指令，当 x 为 1 时，代表的是读指令，即写指令为 0xEC，读指令为 0xED。

在我们使用深度传感器时，我们发送写指令后，还需要对其发送对应的命令，这些命令以十六进制值表示，这样才能对深度传感器进行我们需要的操作，

MS5837 只有五个基本命令,如表 2.2所示。根据发送的十六进制的不同,MS5837-30BA 会执行不同的操作。

表 2.2 MS5837 十六进制值与对应的功能

十六进制值	对应功能
0X1E	复位
0XA2-0XAC	读取出厂校准值 C1-C6
0X48	数据 D1 转换 (压力值数据)
0X58	数据 D2 转换 (温度值数据)
0X00	读 ADC 转换结果 (24 位温度值与压力值)

具体使用过程,就是打开电源开关,深度传感器进行初始化,接着读取校准参数,保存下初始的压力值与温度用于后续深度计算。在读取深度的过程中,首先需要进行数据 D1 与 D2 转化,随后发送读 ADC 转换结果指令,得到温度与压力值信息,根据官方提供的二阶补偿公式计算得到当前时刻水下机器人的深度信息,其代码流程图如图 2.15所示。

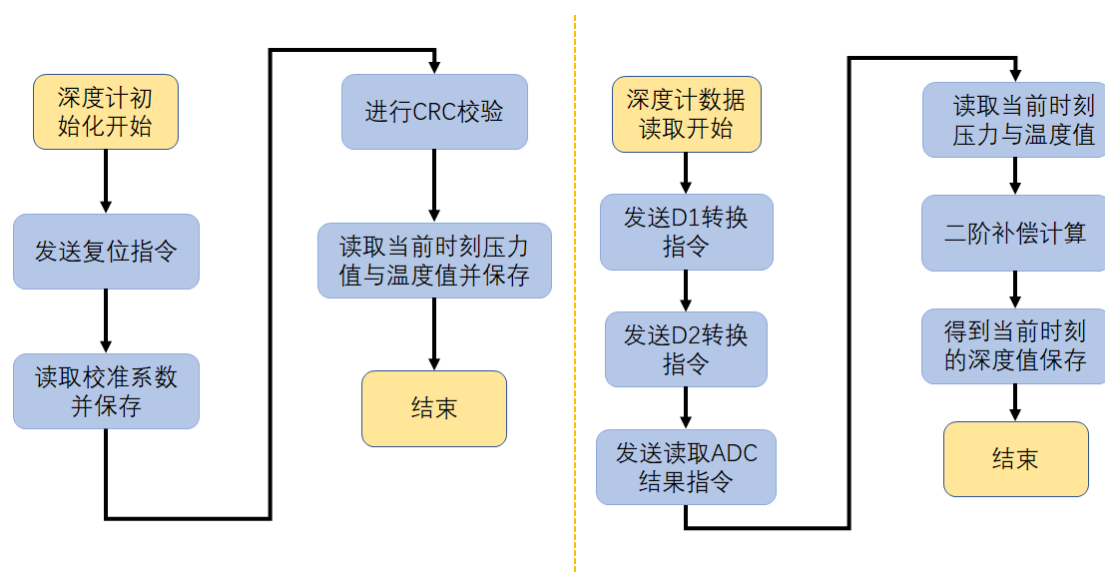


图 2.15 深度计初始化及数据读取流程图

姿态传感器使用的是 MPU-9250,采用 IIC 通信,有 SDA 和 SCL 两根线分别传输数据和时钟信号。MPU-9250 在本项目中是作为从机进行通信,SDA 和 SCL 上拉电阻到 VDD,通过地址进行匹配。MPU-9250 作为从机通信时,它的地址为 7 位 110100X(B),这个地址的 LSB 位由 AD0 引脚的电平确定,这样就可以在一

个系统里面同时连接两个 MPU-9250, AD0 为高电平时, x 为 1, AD0 为低电平时, x 为 0。在进行数据传输时, IIC 每帧数据包含 8 位数据位和一位 (ACK) 数据接收方应答位。从机负责应答位 ACK 的拉低, 当从机正确接收到数据时, 从机会拉低 SDA 总线。

在开始信号发出后, 主机开始发出 7 个地址位和 1 个读写位。读写位决定了主从机的读写状态。然后主机释放 SDA 线, 等待从机的 ACK 应答信号。每次数据传输后必须跟一位读写位。从机应答即是拉低 SDA 到 SCL 高电平周期结束。当主机发出停止命令时, 传输就会结束。然后主机重新发送开始信号继续和其他的 IIC 设备通信。当 SDA 出现上升沿并且 SCL 是高电平的时候, 就表示停止信号。在通信时所有 SDA 信号的变化都是在 SCL 低电平的时候。

写 MPU250 的寄存器的方法: 主机发送开始信号和从机的 7 个地址位再加上 1 位的写入位。当在第 9 个时钟信号的时候, 芯片产生应答。这时, 主机输出寄存器地址, 然后从机再次产生 ACK 应答, 传输过程可以随时由停止信号停止。ACK 响应后, 数据可以继续输入, 除非没有产生停止位。芯片内部自带的递增寄存器可以自动将数据写入相应寄存。以下列出单字节和双字节的传输顺序。

读 MPU9250 的寄存器的方法: 主机发送开始信号和从机的 7 个地址位再加上读位。此时, 寄存器地址变成可读模式。此时会收到 MPU9250 的返回信号 ACK, 然后主机再次发送开始信号和地址, 9250 此时会发回应答信号 ACK 和数据。当主机发送 NACK 或停止位后通讯停止。NACK 信号就是第 9 个时钟脉冲 SDA 保持高电平。下图显示了单字节和双字节的读取时序。

在具体的使用过程中, IIC 通信的实现是通过软件模拟的方式进行的, 即所谓的“软件 IIC”。这种方式通过控制 GPIO 引脚的状态来模拟 IIC 通信所需的信号, 包括起始、停止、数据传输和应答等。所以需要首先进行 IIC 的初始化, 例如使能 GPIO 时钟、GPIO 口初始化等。然后通过操作 MPU-9250 的寄存器实现复位 MPU-9250、唤醒 MPU-9250、设置 MPU9250 陀螺仪传感器满量程范围、设置 MPU9250 加速度传感器满量程范围、设置采样率 50Hz、关闭所有中断等功能, 完成 MPU-9250 的初始化。接着就可以根据协议读取返回的数据内容, 进而对数据内容进行处理并且保存。

2.4.2 执行器驱动

水下机器人的执行器分别为水下推进器、水下照明灯、舵机。在对水下机器人操作的过程中，首先先进行 PWM 的初始化，接着设置 PWM 的频率，最后设置占空比。根据占空比来控制水下推进器的旋转。其中 1500 是停止。大于等于 1000 小于 1500 是反转，大于 1500 小于等于 2000 是正转。根据控制输出的数据，确定对应的推进器的 PWM 信号的脉冲宽度，进而控制每个推进器的旋转方向跟旋转速度。

2.4.3 底层主控框架与流程

3 水下机器人系统建模与仿真

3.1 引言

查找文献下，写一些水下机器人分类，控制系统跟动力学运动学的关系，引用参考文献。

3.2 运动学模型和非完整约束

通过考虑线速度的非完整约束，得到了系统的运动学模型^[19]。非完整约束将系统在某些方向上的速度限制为零，但这些限制并不限制系统的全局运动^[20]。当两个表面相互滚动时，或者在系统的总角动量守恒的天基系统中，就会出现这种约束^[21]。为了建立水下 AUV 的运动学模型^[22]，我们假设两个正交坐标系，全局坐标和本体坐标，如图 3.1 所示。

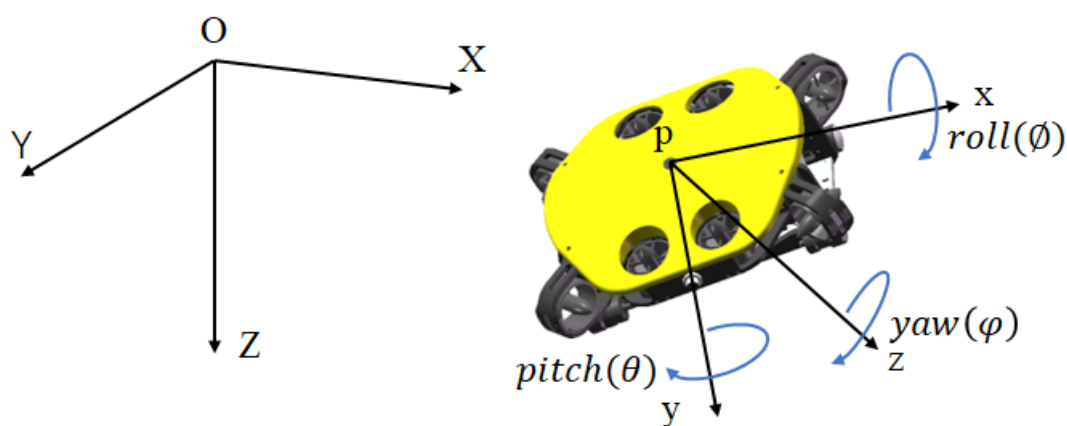


图 3.1 水下机器人坐标系

假如不考虑 yz 方向上的运动，此时 AUV 运动学模型有六个状态变量和四个输入变量。描述两者之间关系转换的运动学坐标系可以用很多个参数表示，以

下运动学模型是用欧拉角的方法建立的^[23]。

$$\begin{aligned}
 R &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a \end{bmatrix} \\
 r_{11} &= \cos \theta \cos \psi \\
 r_{12} &= \sin \theta \sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \\
 r_{13} &= \sin \theta \cos \phi \cos \psi \\
 r_{21} &= \cos \theta \sin \psi \\
 r_{22} &= \sin \theta \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi \\
 r_{23} &= \sin \theta \cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\
 r_{31} &= -\sin \theta \\
 r_{32} &= \sin \phi \cos \theta \\
 r_{33} &= \cos \phi \cos \theta
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

式子中， ϕ 是横滚角， θ 是俯仰角， ψ 是偏航角， R 是绕 xyz 旋转的旋转矩阵， R 是正交单位矩阵，满足 $RR^T = I, R^T = R^{-1}, \det(R) = 1$ 。令：

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} p \\ \eta \end{bmatrix} \tag{3-2}$$

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \omega = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \tag{3-3}$$

式中， p 是本体坐标原点在全身坐标系下的坐标， η 是欧拉角， v 是本体坐标系下 AUV 的速度， ω 是本体坐标系下 AUV 的角速度。使用旋转矩阵可以得到^[24]：

$$\dot{p} = Rv \tag{3-4}$$

定义两个向量：

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = a_1i + a_2j + a_3k, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = b_1i + b_2j + b_3k \quad (3-5)$$

$$i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, j = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, k = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

利用向量叉乘的定义可以得到：

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = (a_2b_3 - a_3b_2)i + (a_3b_1 - a_1b_3)j + (a_1b_2 - a_2b_1)k \quad (3-7)$$

即：

$$a \times b = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} \quad (3-8)$$

把叉乘转化为矩阵相乘的形式可以得到：

$$a \times b = [a \times] b = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

所以得到一个定义：

$$[a \times] = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

对于刚体上的任意固定一点 x_0 ，转换后在全局坐标系下的坐标为 $X(t)$ ，则

$$X(t) = R x_0 \quad (3-11)$$

对等式两边同时求导可以得到：

$$\dot{X} = \dot{R} x_0 + R \dot{x}_0 \quad (3-12)$$

由于 x_0 是一个固定的点，所以 $\dot{x}_0 = 0$ ，所以化简上式可以得到：

$$\dot{V} = \dot{R} x_0 = R v = R w \times x_0 \quad (3-13)$$

式中 V 代表 AUV 在本地坐标系下的速度。进一步化简上式子可以得到：

$$\dot{R} = RS(\omega) \quad (3-14)$$

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

令：

$$\dot{p} = J_1(\eta)v, \dot{\eta} = J_2(\eta)\omega \quad (3-16)$$

显而易见，可以得出如下公式：

$$J_1(\eta) = [\cos \theta \cos \psi \quad \cos \theta \sin \psi \quad -\sin \theta]^T \quad (3-17)$$

根据旋转矩阵的定义可以得到：

$$\begin{aligned} R &= R_{xyz} = R_z R_y R_x \\ &= \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-18)$$

R 对时间求偏导，对于上述式子可以转化为对时间的全导数，得到：

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d(R_z R_y R_x)}{dt} = \frac{dR_z}{dt} R_y R_x + R_z \frac{dR_y}{dt} R_x + R_z R_y \frac{dR_x}{dt} \quad (3-19)$$

同时可以得到：

$$\begin{aligned} \frac{dR_z}{dt} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \psi & -\cos \psi \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \end{pmatrix} \frac{d\psi}{dt} \\ \frac{dR_y}{dt} &= \begin{pmatrix} -\sin \theta & 0 & \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta & 0 & -\sin \theta \end{pmatrix} \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{dR_x}{dt} &= \begin{pmatrix} -\sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \quad (3-20)$$

由式 3-14 和 R 的性质可以得到：

$$\begin{aligned}
 S(\omega) &= R^T \frac{dR}{dt} \\
 &= R_x^T R_y^T R_z^T \left(\frac{dR_z}{dt} R_y R_x + R_z \frac{dR_y}{dt} R_x + R_z R_y \frac{dR_x}{dt} \right) \\
 &= R_x^T R_y^T R_z^T \frac{dR_z}{dt} R_y R_x + R_x^T R_y^T \frac{dR_y}{dt} R_x + R_x^T \frac{dR_x}{dt}
 \end{aligned} \tag{3-21}$$

又因为：

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \tag{3-22}$$

将欧拉角导数记为 $\dot{\eta} = (\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi})^T$ ，由式 3-21 和式 3-22 可以得到 $\dot{\eta}$ 与 ω 的关系式，经过计算可以得出：

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \tag{3-23}$$

所以最后得出^[25]：

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= r_{11}v = \cos \psi \cos \theta v \\
 \dot{y}(t) &= r_{21}v = \sin \psi \cos \theta v \\
 \dot{z}(t) &= r_{31}v = -\sin \theta v \\
 \dot{\phi}(t) &= \omega_x + \sin^2 \phi \tan^2 \theta \omega_y + \cos^2 \phi \tan^2 \theta \omega_z \\
 \dot{\theta}(t) &= \cos^2 \phi \omega_y - \sin^2 \phi \omega_z \\
 \dot{\psi}(t) &= \sin \phi \sec \theta \omega_y + \cos \phi \sec \theta \omega_z
 \end{aligned} \tag{3-24}$$

写成矩阵的形式为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ \sin \psi \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \tag{3-25}$$

也可以写成如下形式：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta \\ \sin \psi \cos \theta \\ -\sin \theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sin \phi \tan \theta \\ \cos \phi \\ \sin \phi \sec \theta \end{bmatrix} \omega_y + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cos \phi \tan \theta \\ -\sin \phi \\ \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \omega_z \quad (3-26)$$

因为此种情况下水下机器人只沿着本体坐标系 \mathbf{x} 轴移动，所以系统有两个约束，即：

$$\begin{aligned} s^T \dot{p} &= 0, & r_{12}\dot{x} + r_{22}\dot{y} + r_{32}\dot{z} &= 0 \\ a^T \dot{p} &= 0, & r_{13}\dot{x} + r_{23}\dot{y} + r_{33}\dot{z} &= 0 \end{aligned} \quad (3-27)$$

把参数带入可以得到：

$$\begin{bmatrix} \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \theta \sin \phi \\ \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \sin \psi \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = 0 \quad (3-28)$$

写成如下简洁形式可得：

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (3-29)$$

$$A(q) = \begin{bmatrix} r_{12} & r_{22} & r_{32} & 0 & 0 & 0 \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

整理上面结果可以得到：

$$\dot{q}(t) = g_1(q)v_1 + g_2(q)v_2 + g_3(q)v_3 + g_4(q)v_4 \quad (3-31)$$

$$\dot{q}(t) = [g_1(q) \quad g_2(q) \quad g_3(q) \quad g_4(q)] \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

$$v_1 = v_x; v_2 = \omega_x; v_3 = \omega_y; v_4 = \omega_z; v_p = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

$$\begin{aligned}
g_1(q) &= [\cos \theta \cos \psi \quad \cos \theta \sin \psi \quad -\sin \theta \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \\
g_2(q) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T \\
g_3(q) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \sin \phi \tan \theta \quad \cos \phi \quad \sin \phi \sec \theta]^T \\
g_4(q) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \cos \phi \tan \theta \quad -\sin \phi \quad \cos \phi \sec \theta]^T
\end{aligned} \tag{3-34}$$

所以此种情况下水下机器人的运动学方程为：

$$\dot{q} = G(q)v_p \tag{3-35}$$

同理，当水下机器人考虑六自由度运动时，此时 AUV 的运动学模型有六个状态变量和六个输入变量，此时：

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \tag{3-36}$$

可以求得：

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\phi s\theta & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\phi s\theta & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \tag{3-37}$$

在上述公式中，为了描述方便，定义： $c = \cos()$, $s = \sin()$, $t = \tan()$ 。

所以水下机器人六自由度运动学方程为：

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} J_1 & O \\ O & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{3-38}$$

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3-39}$$

3.3 水下机器人动力学模型

由于航行器所受到刚体动力学与流体动力学作用到本体上具有同时性，可以根据线性系统的等效叠加原理进行动力学建模^[26]。因此，将水下机器人的动力学

建模主要分为刚体动力学建模与流体动力学建模^[27]。为了更加清晰的描述水下机器人的运动状态，对其参数定义进行汇总，如表 3.1 所示

表 3.1 水下机器人运动参数定义

参考系	位姿	速度	力 (矩)
	惯性坐标系	体坐标系	体坐标系
纵荡	x	v_x	X
横荡	y	v_y	Y
垂荡	z	v_z	Z
横滚	ϕ	ω_x	K
俯仰	θ	ω_y	M
偏航	ψ	ω_z	N

3.3.1 水下机器人的刚体动力学

把 AUV 视为理想刚体，满足理想刚体的所有性质，不考虑水对水下机器人的影响，在体坐标系上使用牛顿定律、欧拉运动定律进行分析，在地球上的惯性坐标系不受地球运动产生的力影响^[28]。根据哈尔滨工业大学理论力学教研室编写的第七版《理论力学 I》可以得到，在本文所定义的坐标系中，对于任意向量 \mathbf{a} ，在体坐标系 p 和惯性坐标系 O 中的导数有以下关系。上标 O 表示惯性坐标系，上标 p 表示本体坐标系即运动坐标系，下标 p/O 表示相对于惯性坐标系下的物理量，下标 pD 表示动坐标系下的物理量，其他以此类推^[29]，所以可以写出如下公式：

$$\frac{{}^O d}{dt} \mathbf{a} = \frac{{}^p d}{dt} \mathbf{a} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{a} \quad (3-40)$$

对体坐标系 p 下的任意一点 D ，其在惯性系下可表示为：

$$\mathbf{r}_{OD} = \mathbf{r}_{p/O} + \mathbf{r}_{pD} \quad (3-41)$$

根据式 3-40 向量导数定义，对式 3-41 两端对时间 t 求导数，得到惯性系下点 D 的速度 \mathbf{v}_D ，具体如下：

$$\mathbf{v}_D = \dot{\mathbf{r}}_{OD} = \dot{\mathbf{r}}_{p/O} + \dot{\mathbf{r}}_{pD} = \mathbf{v}_{p/O} + \left(\frac{{}^p d}{dt} \mathbf{r}_{pD} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{pD} \right) \quad (3-42)$$

因为我们假设水下机器人为刚体，所以：

$$\frac{{}^p d}{dt} \mathbf{r}_{pD} = 0 \quad (3-43)$$

把式 3-43 代入式 3-42 中得到:

$$\mathbf{v}_D = \dot{\mathbf{r}}_{OD} = \dot{\mathbf{r}}_{p/O} + \dot{\mathbf{r}}_{pD} = \mathbf{v}_{p/O} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{pD} \quad (3-44)$$

对式 3-44 进行求导, 得到惯性系下点 D 的加速度 \mathbf{a}_D 在体坐标系下的表示方法, 具体表示为:

$$\mathbf{a}_p = \left({}^p\dot{\mathbf{v}}_{p/O} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{v}_{p/O} \right) + (\dot{\boldsymbol{\omega}}) \times \mathbf{r}_{pD} + \boldsymbol{\omega} \times \left({}^p\frac{d}{dt}\mathbf{r}_{pD} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{pD} \right) \quad (3-45)$$

$$\mathbf{a}_p = {}^p\dot{\mathbf{v}}_{p/O} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{v}_{p/O} + {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} \times {}^p\mathbf{r}_{pD} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{r}_{pD} \quad (3-46)$$

根据式 3-46, 对于水下机器人的质点 G , 可得其加速度为:

$$\mathbf{a}_G = {}^p\dot{\mathbf{v}}_{p/O} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{v}_{p/O} + {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} \times {}^p\mathbf{r}_{pD} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times ({}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{r}_{pD}) \quad (3-47)$$

根据牛顿第二定律, 可得水下机器人在平移时的动力学方程, 表示为:

$$\mathbf{f}_G = m\mathbf{a}_G = m[{}^p\dot{\mathbf{v}}_{p/O} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{v}_{p/O} + {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} \times {}^p\mathbf{r}_{pD} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times ({}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{r}_{pD})] \quad (3-48)$$

根据动量矩定理可以得到:

$${}^O\mathbf{h}_G = \mathbf{I}_G {}^O\boldsymbol{\omega} \quad , \quad \frac{{}^O d\mathbf{h}_G}{dt} = {}^O\mathbf{m}_G \quad (3-49)$$

式中 ${}^O\mathbf{h}_G$ 是惯性系下水下机器人的角动量; \mathbf{I}_G 是水下机器人关于质心 G 的惯性张量矩阵; ${}^O\mathbf{m}_G$ 是水下机器人质点处的合外力矩。根据式 3-40 可以得到:

$$\frac{{}^O d\mathbf{h}_G}{dt} = \left({}^p\dot{\mathbf{h}}_G + {}^p\boldsymbol{\omega} \times {}^p\mathbf{h}_G \right) = (\mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}}) = {}^O\mathbf{m}_G \quad (3-50)$$

根据空间任意力系的简化可以得到:

$${}^O\mathbf{m}_G = {}^p\mathbf{m}_G = {}^p\mathbf{m}_p - {}^p\mathbf{r}_{pG} \times {}^p\mathbf{f}_G \quad (3-51)$$

将其在体坐标系下表示为:

$$\mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} = {}^p\mathbf{m}_p - {}^p\mathbf{r}_{pG} \times {}^p\mathbf{f}_G \quad (3-52)$$

所以根据进一步运算可得水下机器人转动时的动力学模型:

$$\begin{aligned} {}^p\mathbf{m}_p &= \mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} + {}^p\mathbf{r}_{pG} \times {}^p\mathbf{f}_G \\ &= \mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} + {}^p\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_G {}^p\dot{\boldsymbol{\omega}} + m {}^p\mathbf{r}_{pG} \times ({}^B\dot{\mathbf{v}}_{p/O} + {}^B\boldsymbol{\omega} \times {}^B\mathbf{v}_{p/O}) \end{aligned} \quad (3-53)$$

设在体坐标系下, 水下机器人的重心和浮心坐标分别为:

$$\mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} x_G & y_G & z_G \end{bmatrix}^T \quad (3-54)$$

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} x_B & y_B & z_B \end{bmatrix}^T \quad (3-55)$$

令:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z & \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{bmatrix}^T \quad (3-56)$$

将参数带入可以得到通用的水下机器人六自由度动力学方程, 如下:

$$m[\dot{v}_x - v_y\omega_z + v_z\omega_y - x_G(\omega_x^2 + \omega_z^2) + y_G(\omega_x\omega_y - \dot{\omega}_z) + z_G(\omega_x\omega_z + \dot{\omega}_y)] = X \quad (3-57)$$

$$m[\dot{v}_y + v_x\omega_z - v_z\omega_x + x_G(\omega_x\omega_y + \dot{\omega}_z) - y_G(\omega_x^2 + \omega_z^2) + z_G(\omega_y\omega_z - \dot{\omega}_x)] = Y \quad (3-58)$$

$$m[\dot{v}_z - v_x\omega_y + v_y\omega_x + x_G(\omega_x\omega_z - \dot{\omega}_y) + y_G(\omega_y\omega_z + \dot{\omega}_x) - z_G(\omega_x^2 + \omega_y^2)] = Z \quad (3-59)$$

$$\begin{aligned} I_x\dot{\omega}_x + (I_z - I_y)\omega_y\omega_z + I_{xy}(\omega_x\omega_z - \dot{\omega}_y) - I_{yz}(\omega_y^2 - \omega_z^2) - I_{xz}(\omega_x\omega_y + \dot{\omega}_z) \\ + m[y_G(\dot{v}_z - \nu_x\omega_y + \nu_y\omega_x) - z_G(\dot{v}_y + \nu_x\omega_z - \nu_z\omega_x)] = K \end{aligned} \quad (3-60)$$

$$\begin{aligned} I_y\dot{\omega}_y + (I_x - I_z)\omega_x\omega_z - I_{xy}(\omega_y\omega_z + \dot{\omega}_x) + I_{yz}(\omega_x\omega_y - \dot{\omega}_z) + I_{xz}(\omega_x^2 - \omega_z^2) \\ - m[x_G(\dot{v}_z - \nu_x\omega_y + \nu_y\omega_x) - z_G(\dot{v}_x - \nu_y\omega_z + \nu_z\omega_y)] = M \end{aligned} \quad (3-61)$$

$$\begin{aligned} I_z\dot{\omega}_z + (I_y - I_x)\omega_x\omega_y - I_{xy}(\omega_x^2 - \omega_y^2) - I_{xy}(\omega_x\omega_z + \dot{\omega}_y) + I_{xz}(\omega_y\omega_z - \dot{\omega}_x) \\ + m[x_G(\dot{v}_y + v_x\omega_z - v_z\omega_x) - y_G(\dot{v}_x - v_y\omega_z + v_z\omega_y)] = N \end{aligned} \quad (3-62)$$

为了表示方便, 通常将水下机器人动力学方程表示成矩阵形式, 具体如下:

$$M_{RB}\dot{\mathbf{s}} + C_{RB}(\mathbf{s})\mathbf{s} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \quad (3-63)$$

参考文献

- [1] 王潘宇. 基于强化学习的 AUV 运动控制方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学,2022.,
- [2] 郑海斌. 水下机器人水动力性能分析及其运动控制方法的研究 [D]. 哈尔滨工业大学,2018.,
- [3] 张冬梅. 多关节水下机器人的动力学分析与运动控制研究 [D]. 杭州电子科技大学,2023.,
- [4] 程健. 水下机器人水动力性能及其运动控制研究 [D]. 大连理工大学,2018.,
- [5] 叶梦佳. 高速无人水下航行器运动控制系统设计与实现 [D]. 浙江大学,2022.,
- [6] 邓鲁克, 吕东坡. 基于遗传算法对控制水下机器人运动姿态进行 PID 参数整定 [J]. 制造业自动化.,
- [7] 杨睿. 水下机器人建模与鲁棒控制研究 [D]. 中国海洋大学,2016.,
- [8] 李亚鑫, 刘里宵, 王宇. 欠驱动水下机器人的最优等效补偿轨迹跟踪控制 [J]. 控制与决策,2024,39(09):2923-2931.DOI:10.13195/j.kzyjc.2023.0845.,
- [9] Liu L, Zhang L, Pan G, et al. Robust yaw control of autonomous underwater vehicle based on fractional-order PID controller[J]. Ocean Engineering, 2022, 257: 111493.,
- [10] L. Qiao and W. Zhang, "Trajectory Tracking Control of AUVs via Adaptive Fast Nonsingular Integral Terminal Sliding Mode Control," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 2, pp. 1248-1258, Feb. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2949007.,
- [11] K. Eguchi, Y. Yashiro, S. Yasuda, I. Awaya, T. Adachi and Y. Yamauchi, "Low-speed and Low-Altitude AUV Control, " 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. Johns, NL, Canada, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/AUV50043.2020.9267916.,
- [12] C. Wang, W. Cai, J. Lu, X. Ding and J. Yang, "Design, Modeling, Control, and Experiments for Multiple AUVs Formation," in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 19, no. 4, pp. 2776-2787, Oct. 2022, doi: 10.1109/TASE.2021.3094539.,

- [13] V. Filaretov and D. Yukhimets, "Formation Control of AUV on the Base of Visual Tracking of AUV-Leader," 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021, pp. 868-874, doi: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537566.,
- [14] H. F. Ortiz Villasuso, E. Matías Robador and S. Pedre, "AUV Depth Control for Visual Inspection in Closed Environments using Minimal Order Observers," 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. Johns, NL, Canada, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/AUV50043.2020.9267911.,
- [15] W. Akram and A. Casavola, "A Visual Control Scheme for AUV Underwater Pipeline Tracking," 2021 IEEE International Conference on Autonomous Systems (ICAS), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAS49788.2021.9551173.,
- [16] F. Vladimir and Y. Dmitry, "Control system with reference model for spatial motion of a cargo AUV," 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Paris, France, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCAD49821.2020.9260555.,
- [17] 包海默, 李京浩, 冯鸣, 等. 小型自主式水下机器人驱动装置悬停功能仿生设计 [J]. 机械设计, 2022, 39(08):129-135. DOI:10.13841/j.cnki.jxsj.2022.08.021.,
- [18] 林银福, 轻型四自由度 AUV 系统设计与运动性能分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2020.,
- [19] FOSSEN T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. Chichester: John Wiley & Sons Inc, 1994.,
- [20] Wadoo, S., & Kachroo, P. (2011). Autonomous Underwater Vehicles: Modeling, Control Design and Simulation (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10463>.,
- [21] 吴乃龙. 水下机器人建模与非线性自适应控制研究 [D]. 上海交通大学, 2018.,
- [22] ArduPilot Autopilot Suite. <http://ardupilot.org/ardupilot/>. Accessed 2016.,
- [23] CUI R, ZHANG X, CUI D. Adaptive sliding-mode attitude control for autonomous underwater vehicles with input nonlinearities [J]. Ocean Engineering, 2016, 123:45-54.,

- [24] SARHADI P, NOEI A R, KHOSRAVI A. Model reference adaptive PID control with antiwindup compensator for an autonomous underwater vehicle[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 83: 87-93.,
- [25] TEDRAKE R, the Drake Development Team. Drake: A planning, control, and analysis toolbox for nonlinear dynamical systems. 2016. <http://drake.mit.edu>.,
- [26] HUO X, WANG X, GE T. Impulse control method for hydraulic propulsion system used in 3500 m work-class ROV[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 60: 75-83.,
- [27] LAMB H. *Hydrodynamics*[M]. Mineola, New York: Dover Publications, 2015.,
- [28] PRESTERO T T J. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. 2001.,
- [29] ArduSub GitBook. <https://www.ardusub.com/>. Accessed 2017.,

作者简介

一、个人信息

荣振威，男，汉族，中共党员，1999 年出生于安徽省安庆市

二、教育经历

2021.09~2024.06 浙江大学，机械专业，硕士研究生

2017.09~2021.06 浙江工业大学，机械工程专业，本科

三、科研成果

- [1] **Rong Z**, Wei H, Cai C, et al. Underwater Stereo Camera Refractive Calibration and Image Restoration Using Coordinate Constraints[J]. IEEE Robotics and Automation Letters. (一作, SCI, 中科院二区, Under Review)
- [2] Cai C, **Rong Z**, Chen Z, et al. A resident subsea docking system with a real-time communication buoy moored by an electro-optical-mechanical cable[J]. Ocean Engineering, 2023, 271: 113729. (二作, SCI, 中科院一区)
- [3] Gu Y, **Rong Z**, Tong H, et al. Unmanned surface vehicle collision avoidance path planning in restricted waters using multi-objective optimisation complying with colregs[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5796. (二作, SCI, 中科院三区)
- [4] 司玉林, **荣振威**, 顾阳, 等. 一种基于结构光的水下高精度三维成像装置及方法. CN116817794B, 2024. (发明专利, 除导师外第一发明人, 已授权)

四、项目经历

- [1] 海上风电水下运维机器人自主接驳控制技术研究, 机器人技术国家重点实验室开放基金。学生骨干。
- [2] 基于无人系统和人工智能的海上风力机健康监测与容错控制研究, 国家自然科学基金国际交流合作项目。学生骨干。

[3] 水下直升机，国家重点研发计划。学生骨干。

五、在校荣誉

[1] 2023.09 第十八届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛全国二等奖

[2] 2023.09 第十一届全国航行器设计与制作大赛全国二等奖

[3] 2024.03 浙江大学优秀毕业生

[4] 2023.09 浙江大学优秀研究生

[5] 2022.09 浙江大学优秀研究生