

小型水下机器人的总体设计和实现方法

王舒宇, 李俊达, 马 腾, 咎英飞

哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年2月2日; 录用日期: 2023年5月4日; 发布日期: 2023年5月12日

摘 要

本文以自主设计的小型水下机器人为例, 分析了其系统总体设计以及各关键子系统, 包括运动系统、供电系统、通信系统、控制系统、勘察系统以及其他系统等设计的要点和方法。机器人采用模块化和便捷化的设计思想, 可以进行模块化换装, 具备ROV功能多样化。可以对水下一定体积的目标物体进行抓取、捕捞以及深水水域水质采样, 设计的机器人外形多镂空, 并尽可能减小机器人的体积, 使用比较轻便的材料, 使得机器人方便携带, 便于较偏远地区任务的运输工作。经多次实验验证, 该套设计方法同样适用于其他同类型水下机器人的设计和生产。

关键词

水下机器人, 总体设计, 开架式, 子系统

Overall Design and Implementation Method of Small Underwater Robot

Shuyu Wang, Junda Li, Teng Ma, Yingfei Zan

College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

Received: Feb. 2nd, 2023; accepted: May 4th, 2023; published: May 12th, 2023

Abstract

Taking the self-designed small underwater vehicle as an example, this paper analyzes the main points and methods of its overall system design and its key subsystems, including motion system, power supply system, communication system, control system, survey system and other systems. The robot adopts the design idea of modularization and convenience, which can carry out modular replacement and has diverse ROV functions. The shape of the robot that can catch and catch a certain volume of underwater target objects and sample the water quality in deep water is hollow, and the volume of the robot is reduced as much as possible. The use of lighter materials makes the

robot portable and convenient for the transportation of tasks in remote areas. Through many experiments, the design method is also applicable to the design and production of other underwater robots of the same type.

Keywords

ROV (Remote Operated Vehicle), Overall Design, Open Frame, Subsystem

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水下机器人作为一种成本低廉、功能多样且便于携带的先进科研设备, 广泛应用在海洋工程、海洋管理及海洋科研中, 涉及海洋石油天然气探测、海洋底栖生境的保护、海洋垃圾分析、海洋底栖生物、海上地震采集等方面[1] [2]。作为一种装备归于高端制造业, 水下机器人属于国家支持的战略新兴产业范畴, 虽然其体量短时间内不会很大, 但具有战略制高点的作用[3]。然而随着水下机器人的发展, 为了满足搜救、检查、打捞、水产养殖等需求, 水下机器人的功能性愈发趋于单一, 很难应对水下复杂多变的环境, 同时, 小型水下机器人为了实现作业能力, 体积与重量不可避免地增加, 限制了机器人的灵活性, 本文以小型水下机器人为例, 介绍其各系统功能的设计和实现方法, 运用模块化思路, 可更换不同模块以实现多种功能, 在限制水下机器人的重量与尺寸的基础上, 极大程度提高了机器人的便携性, 可供工程设计参考。

2. 国内外研究现状

海洋约占地球总表面积的 71%, 其中蕴含着丰富的能量和资源。随着经济的发展和科技水平的提高, 世界各国越来越重视海洋资源的开发, 尤其是水下机器人的发展, 因其在海洋科学研究、海洋工程作业以及国防军事领域都能发挥重要作用, 海洋机器人得到快速的发展和高度的重视。

2.1. 国外研究现状

二十世纪以来, 美国、日本等海洋大国先后研制成功了用于不同作业目标的混合式水下机器人, 其研究成果得到国际上同领域专家的一致认可。其中最具有代表性的是美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)研制的 Nereus HROV (“海神”号), 该水下机器人自带能源, 以遥控模式(ROV 模式)完成取样和轻作业[4]。且其配备有独立的取样与作业单元, 可在现场短时间进行改装, 由 AUV 模式改装成 ROV 模式, 以适应不同的工作需求。日本东京大学制开发出的 R2D4 智能水下机器人主要用于深海和热带海区矿藏的探测, 利用水底反射的声波来分析水底地形, 并能拍摄高精度图片。其总长度为 4.4 m, 高度为 1.08 m, 质量约为 1058 kg, 能够下潜到 4000 m 深度执行任务[5]。美国 Forum Energy Technologies 开发的轻型工作级 ROV, Comanche 38, 在 2021 年已经成功完成了与 Amundsen Science 的极地海上试验。此 ROV 已被出售给科学研究组织, 将支持北极和亚北极海底生态系统的勘探。该 ROV 安装在加拿大研究破冰船 CCGS Amundsen 上[6]。

2.2. 国内研究现状

我国对水下机器人的研究起步较晚。但近年来, 在有关部门的大力支持下, 我国水下机器人事业发

展取得了长足进步，部分技术达到了国际先进水平，取得了巨大的成就。上海交通大学团队研究的“海龙2号”无人遥控潜水器是我国自主研制的水下机器人，能够在3500米水深、高温高压的复杂的环境下开展海洋调查和作业。该机器人配备了5台多功能摄像机和1台静物照相机，并装有多个不同功能的照明灯组，以及2个多功能机械手，最大可抓取重达250公斤的物体，可为海洋科考提供丰富而详实的一手录像和实物资料。在中国科学院战略性先导科技专项的支持下，中国科学院沈阳自动化研究所主持研发了“海星6000”ROV，能够完成深海生物、沉积物、水样、岩石等系列化取样及激光拉曼的原位测量等作业。国内多个优质单位联合研制的“海马号”是我国自主研制的一款ROV，其框架结构采用6061-T6槽铝焊接而成，它具备耐腐蚀性好、密度小、强度高优点。“海马”号ROV一共配备了包括1台高清摄像机在内的9台摄像机，9只水下灯，摄像照明系统与云台配合使用具有观测效果。系统配置了2套水下机械手。其中，五功能机械手位于本体左前位置，七功能机械手位于右前位置，在水下互相配合工作，可操作各种水下作业工具，执行诸如海底取样、线缆切割等水下作业任务[7]。由于“海马号”外形方正，在水下运动阻力较大，因此其作业时需要母船提供运输和技术支持。“海马”号目前已在我国南海多次完成探索任务。

对于国内水下机器人产业来说，最主要的问题就是核心技术受制于国外，机器人性能不能得到良好的发挥，维修保障成本较高，在国内难以进行大规模生产。但中国海域辽阔，有相当可观的海洋资源，这为水下机器人产业的发展提供了强大的动力和广阔的市场空间。

3. 系统总体设计

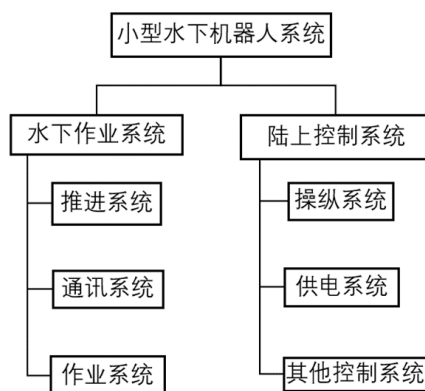


Figure 1. Small ROV system

图 1. 小型 ROV 系统

在有明确的设计需求并充分参考国内外先进 ROV 设计理念的基础之上，本文设计的水下机器人采用开架式结构，保证其有充足的内部空间。如图 1 所示，目前市场上的小型水下机器人主要由陆上控制系统和水下作业系统两大系统组成，上述两大系统还分别包含若干不同子系统。

陆上控制系统由操纵系统、供电系统和其他控制系统组成。操纵系统是操作人员和水下机器人进行人机交互的主要途径[8]，其作用是将操作人员的指令转化为控制信号，并对 ROV 水下作业部分工作时的深度、速度等相关重要数据进行实时反馈，便于监控和调整；供电系统的作用是对陆上电源进行变压整流，为水下作业系统提供电力；其他控制系统用于操作人员根据 ROV 反馈的数据进行调整控制。

水下作业系统是 ROV 实现功能的主载体，其由推进系统、通讯系统和作业系统构成。推进系统的作用是保证 ROV 可以根据控制信号实现相应的航行运动；通讯系统负责陆上控制台和 ROV 之间进行实时视频图像等相关信息的采集和传输[9]；作业系统的作用是根据控制信号实施相应的作业功能，如机械手

对水下目标进行抓取或取样，以及探照灯对水下环境的照明等操作。

4. 陆上控制系统

4.1. 操纵系统

操纵系统为人员操作水下机器人工作提供了一个直观的可视化平台。此系统通常安装于专门的控制箱内，控制箱内置处理器、显示器、输入设备等部件，也可直接安装于笔记本电脑中便于携带和调整。处理器担任数据处理交换，是整个系统的核心部分；显示器用于直接反馈 ROV 在水下实时拍摄的视频图像等相关数据；输入设备如鼠标、键盘等便于工作人员输入操纵指令，如前进、下潜等航行运动。操纵系统已预装有高效且稳定的控制算法，通过建立 ROV 动力学模型、编写预测控制算法等方法来保证操作人员的指令具有响应快、信号震荡程度低的特点，使整个水下机器人系统拥有良好的抗干扰能力。

4.2. 供电系统

由于水下机器人配备的部件全部采用 DC 直流供电，而水下舱体部分空间有限，所以需要供电系统进行直流输出，本文设计的框架式小型 ROV 直接携带直流蓄电池进行供电，在非工作时间段可以将蓄电池单独取出进行充电。这种方式使小型 ROV 的负重有所增加，蓄电池在水密方面的工作也需要保证。ROV 的供电也可通过在陆上的大功率整流变压器，并通过“脐带缆”对 ROV 供电[9]。

4.3. 其他控制系统

陆上的其他控制系统主要负责接收和处理水下机器人工作时的状态信息、传送相应的运动指令等。陆上其他控制系统主要把操作人员的指令通过处理器调整为信号通过“脐带缆”发送给水下部分，同时接收来自 ROV 传输的信息经处理后呈现在操作人员面前。本文设计的小型水下机器人可根据不同的工作和实验需要，呈现不同状态参数变化，便于操作人员调试，以达到对机器人的精确调整。

5. 水下作业系统

水下作业系统通常由推进系统、通讯系统、作业系统等共同构成。机械结构图如图 2 所示。

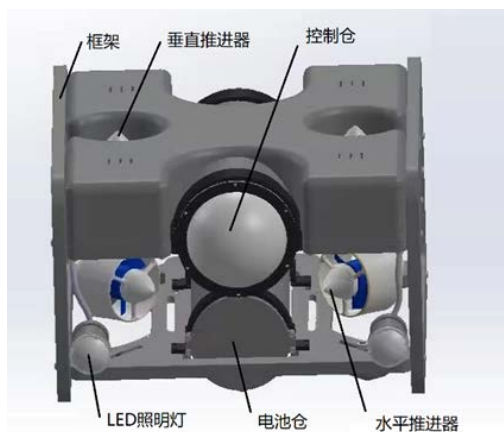


Figure 2. Mechanical structure diagram

图 2. 机械结构图

5.1. 推进系统

水下机器人的推进系统常采用推进器如使用舵翼推进或多推进器推进。前者与船舶操控系统相似，

舵翼机构用于改变航向，对于相对流速较大的水域效果较好，但对于运动速度较小的小型水下机器人来说多推进器推进更容易发挥机器人的机动性。在设计水下机器人的结构之前，可通过建立理论模型进行分析和优化，水动力数学模型建立的详细方法可见文献[10][11]，根据不同的工作要求选择合适的电机和螺旋桨。小型水下机器人使用多推进器推进中的“X”型设计，相较于“十字”型结构具有更加多样的运动姿势，电机使用的是直流无刷电机保证长时间的使用寿命，同时可以通过改变电流方向实现电机的正反转。推进器的设计使得机器人的特征表现更加敏捷，机器灵敏度和机体灵活度得到很大的提升，设计的六推进器水下机器人理论上可实现进退、潜浮、平移、旋转、横滚五个自由度的运动。

5.2. 通讯系统

通讯系统负责陆上操作人员和 ROV 水下部分之间的信息交换。由于陆地上被广泛使用的微波通讯在水下衰减极快，有效传输距离通常只有数米，无法满足远距离通讯需求，且其单位时间内能够传输的信息量较少，无法满足水下实时采集的高清视频图像传输需求。因此，常见的小型 ROV 系统通常采用有线传输方式进行通讯，即配备一根长度足够的柔性电缆，国内称之为“脐带缆”，用来连接陆上控制台和水下本体用于供电和通讯[9]。该通讯系统实现方案的优点在于通讯传播速度快，水下机器人运行工作时稳定性高。

5.3. 作业系统

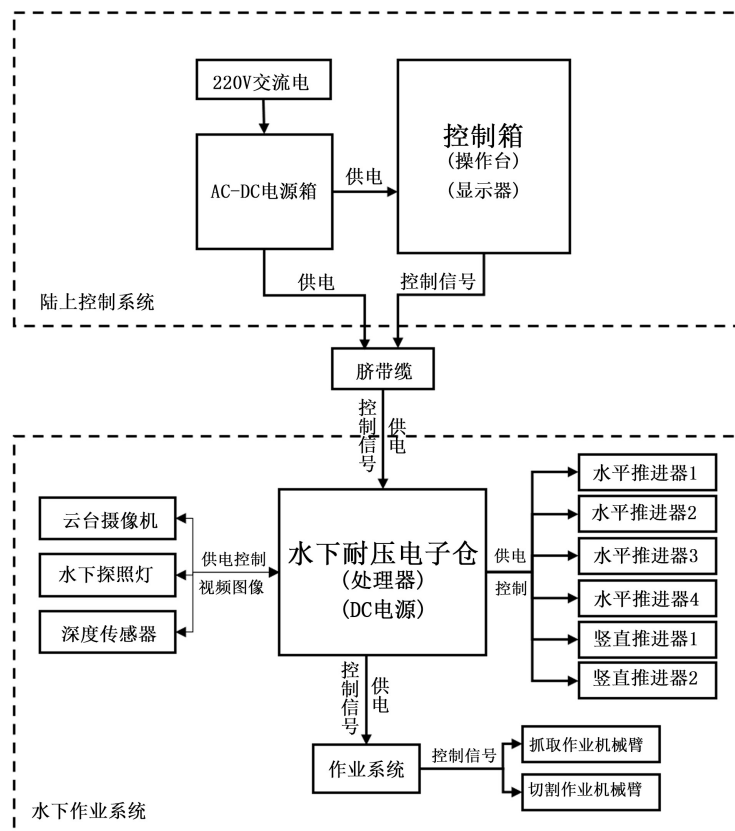


Figure 3. Schematic diagram of the overall design of the small ROV
图 3. 小型水下机器人总体设计示意图

大部分作业型水下机器人都配备有不同种类的多自由度水下机械臂或机械手以完成复杂的作业动作。本文设计对象为小型水下机器人，作业功能为简单的观察拍照、抓取采样以及剪断切割等。观察作

业可通过对小型水下机器人配备高清云台摄像机,为获得更广阔的视野,陆上人员可通过对云台的调整以及加装水下探照灯进行辅助。复杂作业可通过更换作业端来实现抓取、切割等功能,如图4是加装了小型机械手用于抓取作业的小型ROV样机。小型ROV的作业系统预留了多种类型的拓展接口,以适配多种作业端,用于增强其功能的拓展性。合理设计的作业模块可以满足作业系统的功能需求,小型水下机器人总体设计示意图如图3所示。。



Figure 4. Designed small underwater vehicle
图4. 小型水下机器人样机

6. 结语

本文介绍了小型水下机器人的总体设计与实现方法,建模之初,将模型设计成多镂空的开架式结构,实现了便携式的特点。再从陆上控制系统和水下作业系统两方面进行了阐述,本文的机器人可以通过安装专门系统的笔记本电脑进行陆上操控,便于携带且进行操控较为简单;在选择推进系统时,综合考虑小型水下机器人工作时的机动性和灵活性,最终选择了多推进器推进,并采用有线线缆进行通讯,以实现通讯的稳定性高,速度快的特点。整个水下机器人系统造价成本较低,便于加工生产,且采用多模块化设计,便于拆卸与实现多功能的要求,为水下机器人的设计提供了有效的参考。

参考文献

- [1] 白杰,全海燕,汪长辉,等. 水下机器人在深水 OBN 地震采集中的应用[J]. 石油物探, 2022, 61(2): 286-292.
- [2] 王云飞,王志玲,宋伟,初志勇,薛钊. 水下潜器全球研发前沿识别与国家研发布局[J]. 科技管理研究, 2022, 42(14): 14-23.
- [3] 封锡盛,李一平. 海洋机器人 30 年[J]. 科学通报, 2013, 58(S2): 2-7.
- [4] 李一平,李硕,张艾群. 自主/遥控水下机器人研究现状[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 217-222.
- [5] 李艳生. 一种球形水下观测机器人研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [6] Sea Technology (2021) ROV Trials Prep for Arctic Research. <https://sea-technology.com/rov-trials-prep-for-arctic-research>
- [7] 平伟,马厦飞,张金华,黄永展,唐玉涛.“海马”号无人遥控潜水器[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(15): 138-141+145.
- [8] 卞子玮. 可翻转式带缆水下机器人(ROV)的总体设计和水动力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
- [9] 蔡艺超,周军. 一种水下机器人的水面平台控制系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1221-1226.

- [10] 吴家鸣, 郁苗, 朱琳琳. 带缆遥控水下机器人水动力数学模型及其回转运动分析[J]. 船舶力学, 2011, 15(8): 827-836.
- [11] Konoplin, A., Konoplin, N. and Yurmanov, A. (2022) Development and Field Testing of a Smart Support System for ROV Operators. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, Article No. 1439.
<https://doi.org/10.3390/jmse10101439>