

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.019

基于水下管道巡检机器人的优化设计方案

岳宗言, 林 森, 王一丁, 黎翔宇, 蒲子涵, 满文博, 康朕基
(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150000)

摘要: 针对传统水下管道巡检机器人设计存在的弊端, 设计一款水下巡检机器人。结合前沿技术及水下智能机器人的发展趋势, 通过加载双目摄像头, 实现对水下管道小范围的目标精准定位, 并配合机械手远程遥控完成管道表面异物清除及回收。结果表明: 该机器人结构合理, 功能完善, 稳定性与操控性能良好。

关键词: 水下机器人; 智能巡检; 模块化; 控制; 优势

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Optimization Design Scheme Based on Inspection Robot for Underwater Pipeline

Yue Zongyan, Lin Sen, Wang Yiding, Li Xiangyu, Pu Zihan, Man Wenbo, Kang Zhenji
(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of traditional underwater pipeline inspection robot design, an underwater inspection robot is designed. Combined with the advanced technology and the development trend of underwater intelligent robot, the binocular camera is loaded to realize the precise positioning of the target in a small area of the underwater pipeline, and the removal and recovery of foreign bodies on the surface of the pipeline are completed with the remote control of the manipulator. The results show that the structure of the robot is reasonable, the function is perfect, and the stability and control performance are good.

Keywords: autonomous underwater vehicle; intelligent inspection; modularization; control; advantage

0 引言

从 20 世纪 20 年代国外开始研制现代潜水器, 一直到 20 世纪 60 年代, 主要是向深度挑战。目前, 一些大学及研究机构利用机器人实现对水底管道进行跟踪监测, 分为有缆水下机器人(remote operated vehicle, ROV)和无缆水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV), 具有代表性的有: 日本东京大学研制的 Twin-Burger2UV, 在跟踪测试中管道距离水底 1.2 m, 速度为 0.2 m/s, 采样频率 10 Hz; 意大利 Udine 大学研制的 RAIS AUV, 其长 5.5 m, 直径 0.75 m; 最大速度 2 m/s。我国从 20 世纪 80 年代开始较大规模地开展巡检机器人的研制工作, 具有代表性的有: 上海交通大学研制的自主式水下航模, 配备 2 台 CCD 摄像机, 在环境 3 m 深的水池对水下管道故障点巡检, 实现了距离水底 2 m 内位置误差小于 3 cm 的测试; 哈尔滨工程大学水下机器人, 利用微型摄像机在 50 m×30 m×10 m 水池对 5 根 6 m×250 mm 的管道进行检测, 顺利完成了 15 次不同情况的跟踪检测。

笔者在集成现有水下机器人优点的基础上, 还配有动力装置、机械手等, 不仅可以对管道进行巡

检, 还可以进行一些简单作业任务, 更优化使用多摄像头进行水下信息采集及数据叠加处理来规划运动轨迹和人机信息交互; 同时, 引入模块化的机械结构及现代控制技术, 实现了机器人整体抗扰性强、适应性好、操控便捷等优点^[1]。

1 水下机器人的组成

水下机器人按使用的目的分, 有水下调查机器人(观测、测量、试验材料和收集等)和水下作业机器人(水下焊接、水下巡检、水下建筑、水下切割等); 按活动场所分, 有水底机器人、水中机器人和水面机器人。

机器人按其功能结构划分, 可分为 4 层, 即感知层、规划层、控制层、执行层, 这 4 层包含了机器人的整体硬件结构与软件体系结构, 如图 1 所示。

1) 感知层: 通过搭载的位置传感器、深度传感器、惯性传感器、光视觉传感器等, 实现机器人实时获取环境信息、自身运动信息, 以此增强机器人对外界信息感知的精确性和可靠性。

2) 规划层: 水下机器人通过感知层获取信息资源和指令后, 通过规划层来实现各种信息和指令的

收稿日期: 2022-06-23; 修回日期: 2022-07-22

基金项目: 教育部产学研合作协同育人项目(202002251002); 全国大学生创新创业训练计划项目(2020F1028)

作者简介: 岳宗言(2000—), 男, 河南人, 从事人机协作机器人技能学习、水下管道智能巡检机器人研究。E-mail: 386291077@qq.com。

综合判断，并对此作出相应的动作序列响应。

3) 控制层：控制层的作用是根据规划层的指令采取一定的算法来控制机器人执行机构在各自由度上所需完成的动作。

4) 执行层：是将控制层下达的指令合理分配到各个执行机构，如推进器、机械臂及其他外部机构，在实现各机构可控性、机动性、稳定性、安全性的基础上，执行层应根据不同作业需求，合理设计搭载机械结构。

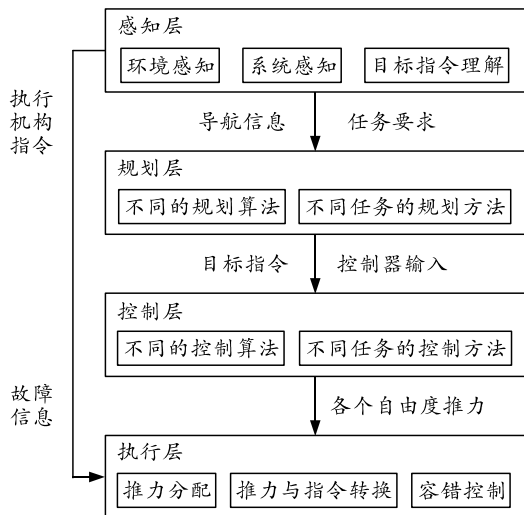


图 1 水下机器人的功能及模块

2 结构的优化设计

水下机器人是一种综合了人工智能和其他先进计算技术的任务控制器，其具备操控简单、反应快等特点，通过不断优化机械结构和整体的水密性，可以最大程度辅助人类在水下未知和复杂环境中执行特殊任务^[2]。

2.1 机器人整体结构

以模块化设计的理念为基础，充分融合人工智能、深度学习、人机交互等技术，从驱动材料、结构特性变化和功能实现方面进行改进，对机器人的整体结构进行深入探索研究。通过对机器人本体各功能进行结构分析、设计，不断优化算法，实现驱动结构的稳定化、控制系统的便捷化、电路算法的集成化和外部结构的模块化，如图 2 所示，进一步完善其水下多自由度浮游运动的动力学建模及水动力学特性分析，使机器人的内部结构和外部形状更好地适应水下环境，进而实现机器人能够自主沿着管道航行，并按照预定计划对管道漏点进行观测和管壁异物的识别、报警和清除作业，从而提高机器人的整体智能化水平。

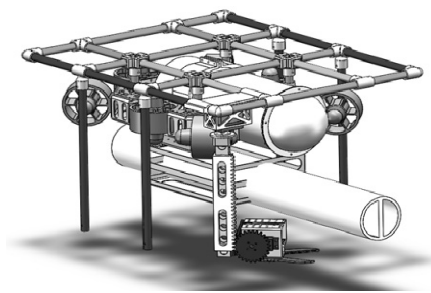


图 2 整体结构

2.2 耐压舱与支撑框架结构

结合环境条件，对机器人总体框架结构的流体性能、动力系统、电路控制与通信接口等进行优化，旨在合理提升耐压舱空间的使用率，将耐压舱设计为如图 3 所示圆柱形舱室，由 5 mm 亚克力柱作为舱壁，2 mm 亚克力半球罩作为前盖。此设计能最大程度削减下沉过程中浮力带来的影响，其紧凑的设计既保证了航行时整体结构的可靠性，又在内部留有足够空间用来放置主要的电子元器件。整体机架采用 5051 铝合金钣金框架，如图 4 所示，表面喷砂+阳极氧化处理，预留工艺孔位便于走线，相对于板材框架，无应力腐蚀裂倾向，受浮力影响更小，下沉效果更好。

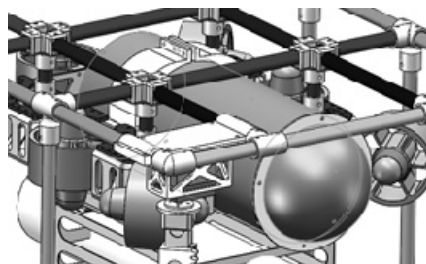
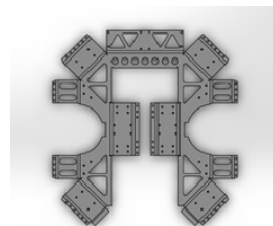
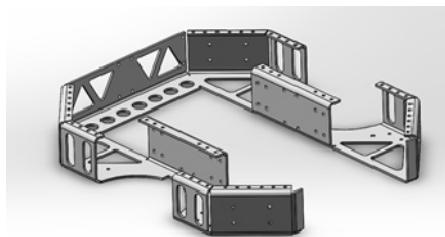


图 3 机器人耐压舱



(a) 框架主视图



(b) 框架侧视图

图 4 铝合金钣金框架

2.3 推进器的新型布局及选择

电机推进是水下机器人最常用的推进形式之一，以螺旋桨推进器为典型，其利用防水电机作为动力源带动桨叶旋转，通过水的反向作用力推动机器人^[3]。通过推进器的综合布局，实现机器人的姿态变换。相对于传统的六推进器布局，在实际执行任务时不能很好地保证在倾斜管道上稳定运行。基于数据分析和实验仿真的验证结果，笔者提出一种优化设计思路，安装 7 个螺旋桨推进器，即基于传统布局的理念上，在尾部额外增加一个推进器，如图 5 所示，配合确定水平方向和垂直方向上 2 组电机的目标转速^[4]，从而更方便地调整俯仰角度和保持倾斜姿态。整体采用 ROV T60 推进器，2217 无刷直流电机，电机电压 700 kV，额定功率 300 W，最大推力 2.6 kg；电调采用 40 A 双向无刷电调，在水中行进速度约 0.17 m/s。

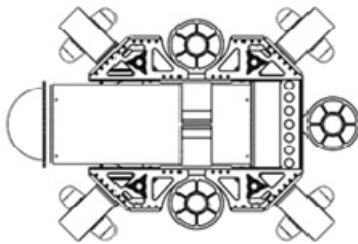


图 5 推进器分布

2.4 基于碳管结构的模块化框架

当前的水下机器人只能针对某几项特定工作进行作业，如果要添加或调整功能，需要从内部拆解再进行繁琐的结构改动。基于此弊端，运用模块化的理念，在机器人上方设计了由碳纤维管围出的框架，碳纤维管泊松比为 0.307，弹性模量 $\geq 2.1 \times 105$ MPa，方便更换拆卸而且结构的刚度和强度都很强，可有效抵御外界带来的冲击力。框架尺寸限制在了 500 mm×400 mm×300 mm，并设计成 9 个独立的小框，如图 6 所示，用于安装探照灯、夹爪机械臂、配重物以及其他机构，与市面上的大部分水下机器人相比，在保证满足拓展功能的情况下，体积大幅度减小，对于一些狭窄的环境有着更强的适应性和通过性。

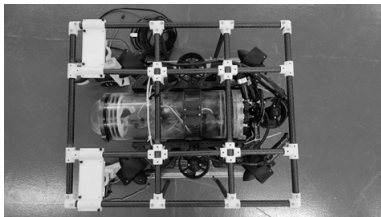


图 6 模块化九格框架

3 电气系统的分析与优化

3.1 多传感器融合

水下机器人作为特种作业的智能设备，稳定运转的关键在于多传感器的应用及数据衔接的精确性，需要一套合理的系统来保障轨迹运行与精准作业。此系统需要集成信号传输、容错控制、策略规划、数据处理、反馈执行等技术，使机器人的运动始终保持形态控制，以实现机器人在水下巡检作业时，能应对各种复杂多变的、不确定的和未知的环境。传感器包括定位装置、ICM-20602 姿态传感器、MS5837 水压传感器(分辨率 20 Pa，量程 0~3 000 kPa，工作温度 -20~+85 °C)、威鑫视界 SY020HD-V1 摄像头(3.5 mm 焦距 120° 广角)等，以实现机器人在水下的姿态控制、深度控制、水压检测和寻迹控制等。

3.2 机器人的控制方案

水下机器人的综合控制需要涉及到多项关键技术并将其进行合理整合，实现地面接收系统和水下航行器的紧密配合，利用信号通信完成运动指令传输、位置共享和数据反馈、水图像传输、外部情况及电池电量检测，并通过自身携带控制单元、数据收集反馈单元和电源系统来共同支撑完成水下作业所需的各种规定工作。

1) 电路控制方案：机器人采用树莓派 4B 为上位机，进行图像处理等复杂运算，搭配恩智浦公司的 32 位微处理器 K66 作为下位机，上位机通过 UART 串口通信方式将指令发传送至下位机，进行数据采集、控制驱动电机、运行控制算法等任务，并输出 PWM 信号，实现对各推进器速度、功率及整体运动姿态的调控，电路设计如图 7 所示。此外，在水下复杂多变的环境中，机器人可以通过本方案来将采集的实际数据量和分析结果实时传输交换，以保证水下机器人数据反馈的及时性^[5]。

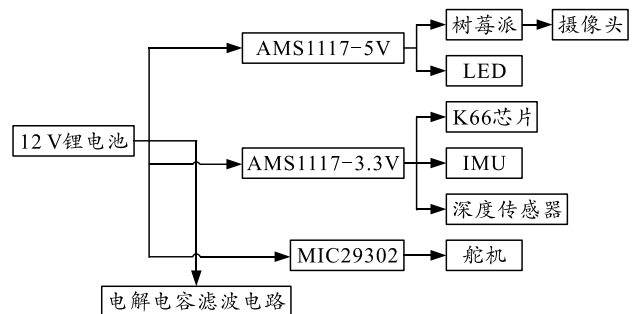


图 7 电路设计

2) 数据算法逻辑：机器人的运动可以分解为巡

线前进、保持平衡、调整深度 3 种运动。上述运动分别利用一个控制环进行控制。巡线前进控制环的输入为树莓派图像处理后的反馈，保持平衡控制环的输入是陀螺仪的角度测量，调整深度控制环的输入是压力传感器的水压数据。3 个控制环的输入经过 PID 控制算法的运算，分别得到 3 组 PWM 的占空比值，根据运动的分解和合成原理，将 3 组 PWM 信号进行叠加，便可得到最终的控制信号输出，来控制 7 个推进器的转速和转矩，实现机器人巡线前进、姿态平衡和深度调整的运动。

3.3 核心控制芯片

基于上述核心部件的供电要求，机器人采用 12 V/20 000 mA 的锂电池作为动力电源，并通过选用的 MIC29302 和 AMS1117 两款稳压芯片来转换，以提供 6 和 3.3 V 的运转电压，充分考虑其具有极

低的功耗、强大的抗干扰能力和高速 8 位微处理控制；同时，该芯片在运行过程中对信息的处理非常安全，加密后无法解密^[6]。作为舵机稳压芯片，电源输出端添加电解电容器滤波电路，来抑制推进器工作造成的电源纹波，降低电源电压波动对电路板的冲击，提高工作稳定性。

4 巡线路径规划

在机器人的路径规划控制过程中，通过摄像头 45° 倾斜向下，最远可看到机身前方 30 cm 以上的管道图像，利用索贝尔算子对管道进行边缘检测，提取管道中线，以此作为期望输入，利用 PID 控制器来实现机身沿管道前进。如图 8 所示，旨在通过数据采集分析实现机器人自主区域覆盖航行，避免由急停、急转、刹车和倾斜俯仰性能薄弱带来的控制时滞性差的问题^[7]。

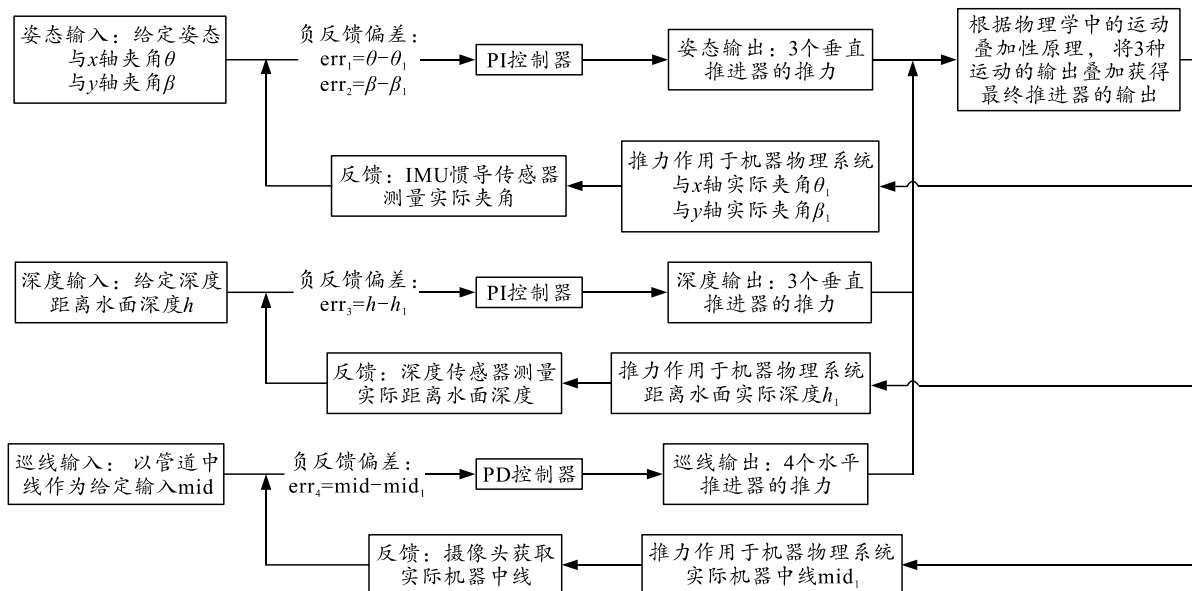


图 8 路径规划实施过程

通过硬件系统与相应算法综合应用，叠加图像识别及传感器反馈数据信息，使机器人在遥控和自主双模式下进行工作状态的切换，实现对管道及表面附着物全方位监测，修正导航误差，航行中实时传输水下画面，并通过记录反馈信息构建 3 维环境模型，及时合理规划运动轨迹^[8]，最大程度避开路径中的障碍物，同时避免产生轨迹累计偏差及损坏机器。

5 视觉识别图像采集

在机器人整体控制中，视觉识别是支撑数据来源采集及水下规划作业的重要一环，其核心任务就是对水下环境及物体不间断地进行特征提取、

图像分割和对获得的图像进行辨识^[9]，通过数据输出进行关键数据处理和分析，并及时反馈给操控平台。

5.1 管道轮廓识别

机器人共使用 3 个摄像头，舱内的主摄像头用于轮廓提取和巡线，通过内外参标定、图像处理、图像特征提取等，对图像进行增强，在强化后按照其实际情况来进行复原，重建新的图像，利用自适应卷积运算产生融合灰度值，再利用融合灰度值对 Sobel 算子检测结果进一步筛选出边缘轮廓点^[10]，如图 9 所示，而后根据轮廓提取中线，实现管道路径精准识别。

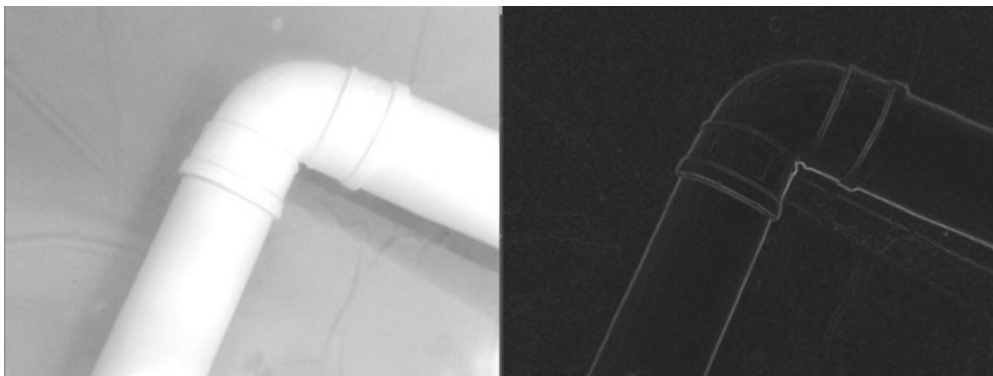


图 9 Sobel 算法轮廓提取效果

5.2 附着物的识别

对于附着物的识别,采用 SGBM 算法实现视觉立体图像匹配,通过在两侧机械臂的副摄像头配合主摄像头用于识别目标以及定位,3 个摄像头到中心呈 120°夹角,利用形心定位的方式对附着物进行定位及轮廓尺寸测量,过程中将原本模糊的图像做进一步清晰化处理,以此获取附着物形心的 3 维坐标并计算出实际形状及尺寸。

6 优化管壁异物抓取机械爪

机械手作为在水中作业的主要结构,适用于执行各种特殊任务,将机械手与巡检机器人有机地结合,实现对管壁上物体的抓取和清除。机械手的设计应从实际出发,由于管壁各个方向都有可能分布异物,而对于管底等特殊位置异物的抓取和收集较为困难;因此,其应具备一定的作业精度和灵活度^[11]。设计采用滑轨式机械臂,由上、下 3 个 PDI-6221MG-180 防水舵机驱动,最大扭矩 20.32 kg/cm,如图 10 所示,过程中,上端舵机左右转动,下端 2 个舵机一个沿导轨方向控制夹爪上下运动,另一个控制机械爪开合,配合图像识别实现附着物的精准定位,高效抓取清除,避免了复杂的循迹过程。

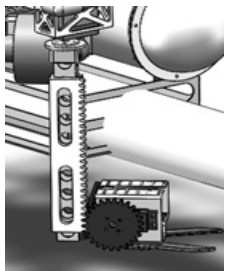


图 10 机械臂构成

7 结束语

笔者针对水下复杂作业环境,对比现有水下机

器人的设计思路及存在的不足,基于模块化的设计理念,对机器人进行整体结构、外形尺寸、材料选择、电路控制、信号处理等一系列优化设计,增强了机器人整体适应性与可操作性,并通过样机制作、信息采集及数据分析进一步验证了方案的可行性、有效性、正确性,使机器人在水下巡检作业中结构稳定性与操控性能得到了提升,为后续设计提供了参考与帮助。

参考文献:

- [1] 南通大学智能水下检修机器人完成水下巡检作业[J]. 传感器世界, 2021, 27(8): 37.
- [2] 朱明明, 辛绍杰, 邓寅喆. 水下机器人姿态融合算法研究[J]. 上海电机学院学报, 2021, 24(4): 228-233.
- [3] 张继威, 于复生, 隗志龙, 等. 水下推进形式应用现状及发展趋势[J]. 船舶工程, 2021, 43(6): 61-65, 78.
- [4] 钟思, 付书媛, 李玉寒, 等. 水下管道智能巡检清理机器人的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021(13): 99-100.
- [5] 李晨. 一种水下管道巡检机器人的设计与优化[J]. 中国科技信息, 2020(1): 73-74.
- [6] 刘旭东, 王爽. 基于物联网的水下机器人设计与实现[J]. 科学技术创新, 2021(19): 182-183.
- [7] 许文瑶, 贺继林. 基于改进速度障碍法的水下机器人动态避障[J]. 电光与控制, 2021, 28(12): 86-90.
- [8] 朱旭芳, 马知远, 潘丽. 一种轻小型智能扫雷机器人的设计与实现[J]. 软件导刊, 2017, 16(3): 62-65.
- [9] 孟利华, 蔡雨欣, 闵琴, 等. 智能机器人控制系统技术在环境监测中的应用[J]. 科学技术创新, 2019(33): 83-84.
- [10] 化春键, 熊雪梅, 陈莹. 基于 Sobel 算子的工件圆弧轮廓特征提取[J]. 激光与光电子学展, 2018, 55(2): 239-246.
- [11] 乔栋, 谢亚龙, 姚涛. 四自由度水下机械手系统设计与仿真[J]. 机床与液压, 2021, 49(17): 157-163.