

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.015

基于矢量控制的开架式水下机器人

孙海超¹, 邓彦松²

(1.西南民族大学电气工程学院, 成都 610200; 2.西南民族大学电子信息学院, 成都 610200)

摘要: 为提高水域垃圾清理工作的效率, 降低人力劳动成本, 设计一种集清理水面及水底垃圾于一体的多功能水中机器人。该机器人装有能够控制开关舱门的垃圾收集装置以储存收集到的垃圾; 搭配的五轴机械臂可完成水面下垃圾的定点清理; 设计有能够在纵轴和周轴方向转动的矢量推进器; 并配备有传统锂电池系统和新型铝-水电池系统。结果表明: 该机器人水中的姿态更加平稳, 可在不同水域下工作。

关键词: 多功能; 垃圾清理; 五轴机械臂; 矢量推进器; 铝-水电池系统

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Open-frame Underwater Vehicle Based on Vector Control

Sun Haichao¹, Deng Yansong²

(1.College of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610200, China;

2. College of Electronic and Information, Southwest Minzu University, Chengdu 610200, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of water garbage cleaning and reduce the labor cost, a multifunction underwater robot was designed to clean the water and underwater garbage. The robot is equipped with a garbage collection device that can control the opening and closing of the cabin door to store the collected garbage. A five-axis robot arm can complete the fixed-point cleaning of the garbage below the water surface, a vector propeller that can rotate in the longitudinal and circumferential directions, and a traditional lithium battery system and a new aluminum-water battery system. The results show that the posture of the robot in water is more stable, and the robot can work in different waters.

Keywords: multifunction; garbage disposal; five-axis manipulator; vector thruster; aluminum-water battery system

0 引言

随着国民经济迅速发展和城镇化进程的加快, 水面垃圾污染问题日益加剧, 已经严重威胁到水体环境、交通以及城乡景观^[1]。具备单一功能的水面垃圾清理机器人已较为常见, 但缺乏能够高效清理水底垃圾的机器人。笔者针对这一市场背景, 对水面垃圾清理机器人的功能进行扩展。

1 机械结构设计

1.1 整体结构设计理念

经过对湖泊、河道、海岸等水域的实地调查发现, 水面垃圾不光有水草等水生植物, 还存在大量的漂浮物垃圾。这类垃圾主要分布在离岸边较远的水面区域, 人工清理将耗费大量的人力、财力以及精力。面对水面、水下两用场景, 机器人具有 6 大特点:

- 1) 装有 3 组共 6 个传统水下推进器, 能使机器人灵活实现上升、下潜、前进、后退等动作;
- 2) 装有 1 个可旋转的矢量推进器, 帮助机器人

实现低速下的姿态微调;

- 3) 搭载五轴机械臂, 能帮助机器人完成对中小型水下垃圾的定点清理工作;

- 4) 设计垃圾存储装置, 使机器人能一次完成较多垃圾的收集, 并能配合机械臂完成对水下目标的收集工作;

- 5) 配备有铝-水电池系统, 能利用海水进行化学反应, 产生机器人稳定运行所需要的全部能源;

- 6) 整体结构的材料将采用轻质玻纤, 并设计减重孔, 从而减轻机器人的自身重量。

机器人设计参数如表 1 所示。

表 1 机器人设计参数

初始尺寸/mm	最大伸展尺寸/mm	重量/kg	负载能力/kg	执行器件个数
845*600*400 (长*宽*高)	1 056*973*1 118 (长*宽*高)	20	15	10

1.2 整体 3D 图纸

水下机器人的机械结构详如图 1 所示。

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2022-07-20

基金项目: 2021 年大学生省级创新创业训练项目(S202110656089)

作者简介: 孙海超(2000—), 男, 河南人, 从事机器人和多机器人控制、电气等领域研究。E-mail:931871016@qq.com。

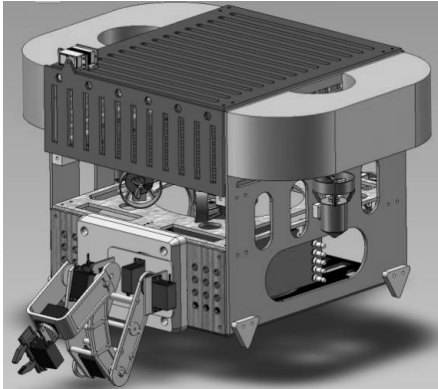


图 1 水中机器人建模

1.3 垃圾收集舱

机器人设计有垃圾收集舱，该装置选用玻璃纤维板，实现质量最轻量化。该结构通过一个 360°舵机带动旋转的门实现装置的打开与闭合，具体机械结构如图 2 所示。

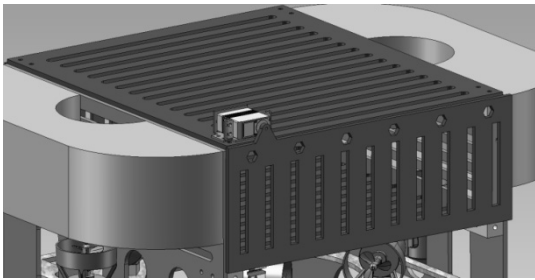


图 2 垃圾收集舱

1.4 五轴机械臂

为抓取水下垃圾，在机器人前底端装载五轴机械臂。五轴机械手可在高温、高压、潮湿等恶劣环境下实现多种运行，完成人类无法完成的操作^[2]。

机械臂材料为铝合金，力学参数见表 2 所示。

表 2 铝合金力学参数

铝合金 牌号	密度/ (g/cm)	电阻率/ (Ω·mm ² /m)	泊松比	拉伸强度 /MPa	屈服强度 /MPa
5052-H112	2.72	0.05	0.33	175	195

分别在机械臂面的法线方向施加 300 N 的外力，模拟机械臂在水下的受力情况，分析结果如图 3 所示。

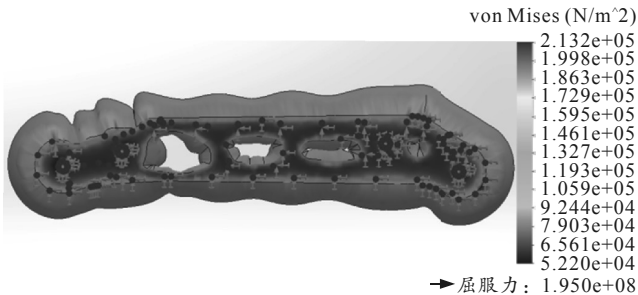


图 3 小臂静应力分析

机械臂可做出不同角度的立体动作，能做到对机器人各个方向垃圾的夹取并将其放置到顶部的垃圾收集装置中。机械臂的关节处使用全金属防水数字舵机，保证其能在复杂水域下可靠作业。实际应用时，可按照华中科技大学刘世平项目组提出的建模方法进行坐标变换，实现机械臂仿人的动作模仿^[3]。五轴机械臂的机械结构如图 4 所示。

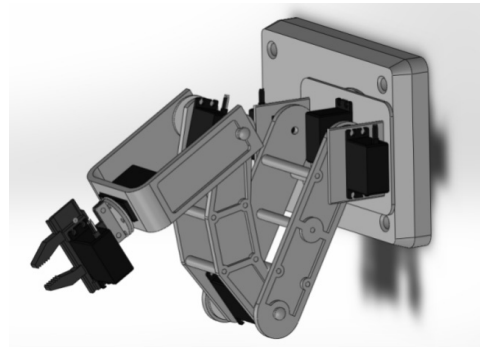


图 4 五轴机械臂

1.5 高速下的动力模块

该机器人采用水平推进器、垂直推进器对称放置的动力结构来稳定调整机器人高速时在水中的姿态。

底盖的镂空设计，可提高排水及抗浪花的作用，确保工作时的安全性^[4]。

机器人的动力由固定在四周的水下推进器提供，头部与尾部的 2 组推进器能帮助机器人实现前进和后退。腰身的一对推进器，通过改变螺旋桨的旋转方向，实现上升和下潜。相比较于传统四推进器结构，6 个推进器能够更加平稳、灵活地工作在复杂水域中。动力模块整体结构如图 5 所示。

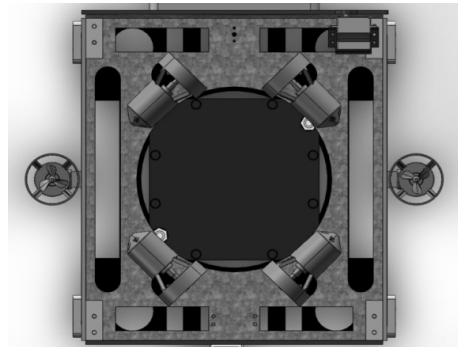


图 5 水中机器人动力模块

1.6 矢量推进器

水中机器人的运动性能除了运动平衡外，还应包括机器人定点工作时姿态调整的操作性。为提高机器人在水底进行定点清理工作时的定点精度，笔者在机器人尾端加装了能够轴向转动的矢量推

进器。

在低速时，采用矢量推进器，能使机器人具有良好的转向性能^[5]。

为后续对机器人的动力学行为进行仿真和预测，应针对该矢量推进器单独建立动力学模型。

笔者采用天津大学王玉等^[6]建模的前提和方法对该机器人矢量推进器产生的力或力矩的分析。

设机器人自身的体坐标系 $Oxyz$ ，矢量推进器的研究坐标系 $PXYZ$ ，如图 6 所示。 Ox 沿机器人纵轴，向前为正； Oy 沿机器人侧向，向右为正； Oz 垂直于 Oxy 平面。矢量推进器结构如图 7 所示。

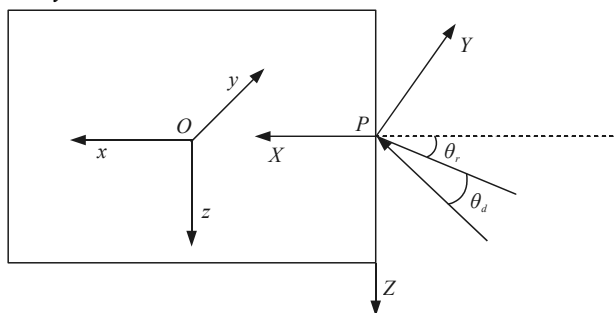


图 6 矢量推进器的推力

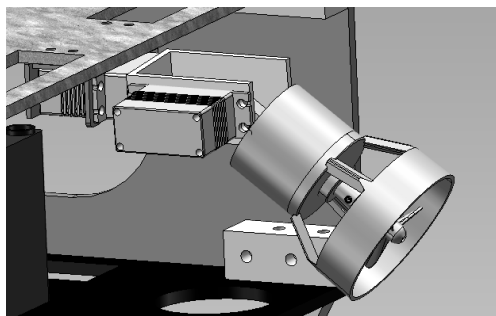


图 7 矢量推进器结构

设矢量推进器在 P 点产生一个推力 F ，不难知道，力 F 为矢量。设推力 F 与 PXZ 平面的夹角为 θ_r ，推力 F 在 PXZ 平面的投影与 X 轴之间的夹角为 θ_d ，则得到推力 F 在 $PXYZ$ 坐标系的各坐标轴上的分量为：

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \theta_r \cos \theta_d \\ F_y &= F \sin \theta_r \\ F_z &= -F \cos \theta_r \sin \theta_d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

若矢量推进器的推力 F 不在机器人的纵轴上时，将会对机器人产生一个力矩，设该力矩为 M ，则不难算出 M 在 $Oxyz$ 的 y 轴和 z 轴上的分量为：

$$\left. \begin{aligned} M_y &= F_z \times l_{PO} \\ M_z &= F_y \times l_{PO} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 l_{PO} 为推力 F 作用点 P 到 $Oxyz$ 坐标系原点 O (机

器人的浮心) 的距离。则可得出，矢量推进器产生的力或力矩为：

$$\tau_F = \begin{bmatrix} F \cos \theta_r \cos \theta_d \\ F \sin \theta_r \\ -F \cos \theta_r \sin \theta_d \\ M_F \\ -F \cos \theta_r \sin(\theta_d) l_{PO} \\ F \sin(\theta_r) l_{PO} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 M_F 为推力 F 对机器人纵轴产生的负载扭矩：

$$\left. \begin{aligned} F &= K_F \rho D_p^4 n^2 \\ M_F &= K_M \rho D_p^5 n^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： D_p 为推进器螺旋桨的直径； ρ 为流体密度； K_F 为推力系数； K_M 为负载力矩系数。

2 铝-水电池系统

水下机器人的作业环境十分恶劣。海水具有腐蚀性，压力随着深度的增加而急剧增加，电池的安全性和续航显得尤为重要。

笔者参考刘勇等^[7]针对水下无人平台用电源发展现状的论述，将铝-水电池系统运用在水下机器人。

铝-水电池系统不同于传统概念的铝空(氧)电池，可以在无氧条件下使用^[8]。

相较于普通锂电池，铝-水电池系统更安全、便宜、持久。它由合金铝形成的阳极、多种元素(主要是镍)合金形成的阴极和位于电极之间的碱性电解质组成。这种电池的电力是常规锂电池的 10 倍。

当配备电池系统的水下机器人进入海洋后，电池开始吸入海水，在阴极被分解为氢氧根阴离子和氢气。氢氧根阴离子与铝阳极相互作用，生成氢氧化铝并释放电子。产生的电子再向阴极移动形成循环，由此源源不断地向外界提供电能。该过程的产物是氢氧化铝和氢气，均无需作无害化处理即可排放。电池外型与工作如图 8 和 9 所示。



图 8 OWP 电池系统

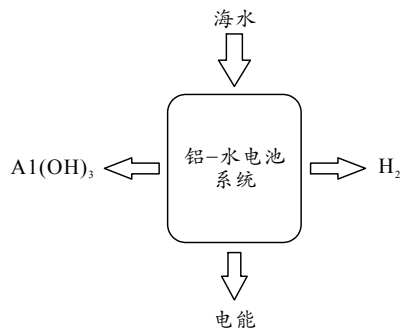


图 9 铝-水电池系统工作

3 实际应用价值及市场化前景

3.1 清除水面垃圾

我国水面漂浮垃圾治理设备呈现出大型化、专业化、无人化的发展趋势^[9]。机器人可以高效率、低成本地完成对指定水面区域的垃圾回收工作。

3.2 清理水底垃圾

传统水底垃圾清理方式需潜水人员携带清理网进行水下作业，特别是在海底垃圾清理作业时，如果遇上极端天气或者海底暗流，将会对工作人员造成生命危险。该机器人搭配水下摄像头，可进行远程操控，定点清理水底的垃圾，保证人身安全。

3.3 市场化前景

近年来，国内外的研究主要集中在某些产业技术路线制定方面、如何制定出更好更合理的技术路线，或者运用技术路线图来促进某些产业、技术的发展等^[10]。

如图 10 所示，2021 年水下机器人行业市场销售额达到 87.4 亿元，水下机器人行业市场需求旺盛。

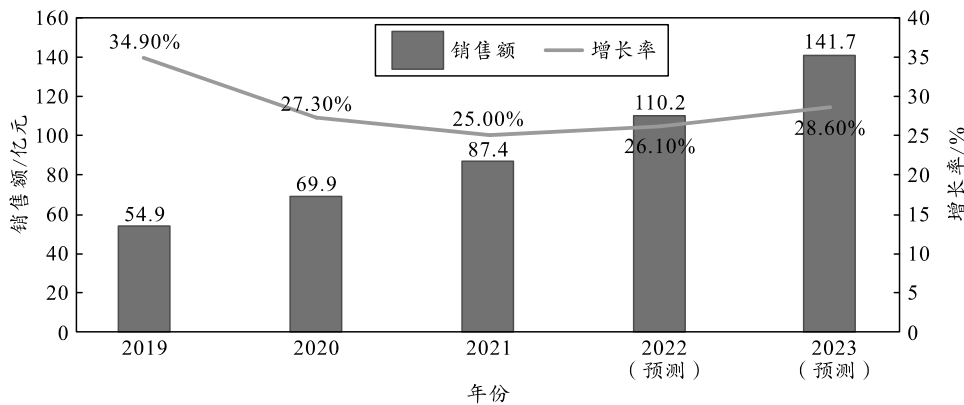


图 10 中国水下机器人行业市场规模调查

4 结束语

该机器人能够完成对水面垃圾和水底垃圾的清理工作。机械臂的加入，使得机器人能够夹取各种位置的垃圾；水平推进器和垂直推进器的对称设计，使其在水中的姿态更加平稳。下一步，将推动该机器人进行实际生产及使用。

参考文献：

[1] 陈海滨, 马一凡, 汪俊时, 等. 内河水面垃圾清捞收集及相关问题探究[J]. 工业安全与保护, 2021, 47(S1): 83-85.
 [2] 刘燕, 邹萍, 管文娟. 基于 PLC 的三轴机械手控制系统的设计与实现[J]. 制造业自动化, 2016, 38(7): 21-24.
 [3] 刘世平, 胡竹, 程力, 等. 仿人机器人手臂动作模仿系统的研究与实现[J]. 机械设计与制造, 2022(2): 300-304.

[4] 陈洁, 刘洪亮. 水下机器人用动力装置的设计[J]. 山东工业技术, 2020(6): 89-92.
 [5] 曹永军, 张云亮, 李丽丽, 等. AUV 矢量推进器的设计[J]. 自动化与信息工程, 2017, 38(4): 1-7.
 [6] 王玉, 林秀桃, 宋诗军, 等. 矢量推进自主水下航行器动力学建模及仿真[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(2): 143-148.
 [7] 刘勇, 石治国, 王传东. 水下无人平台用电源的发展现状[J]. 电源技术, 2016, 40(9): 1903-1904.
 [8] 宋强, 卢凯发, 赵满. 铝空(氧)电池与铝水电池水下应用可行性分析[J]. 船电技术, 2020, 40(8): 25-28.
 [9] 刘璇, 孙鑫, 朱宏楠, 等. 我国近海漂浮垃圾污染现状及应对建议[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(5): 23-29.
 [10] 王永杰, 刘海波, 张亚峰. 市场导向下科研人员创新过程特点及其对我国科技成果转化的启示——对水下捕捞机器人创新过程的扎根研究[J]. 科技管理研究, 2021, 41(19): 1-9.