

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04739>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 张云飞, 杨少龙, 吴丁一, 等. 可变形水下作业机器人总体设计及作业分析[J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 125–136.  
ZHANG Y F, YANG S L, WU D Y, et al. Overall design and operational analysis of a morphable underwater intervention robot[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 125–136 (in Chinese).

# 可变形水下作业机器人总体设计 及作业分析



扫码阅读全文

张云飞<sup>1</sup>, 杨少龙<sup>\*1,2,3</sup>, 吴丁一<sup>1</sup>, 向先波<sup>\*\*1,2,3</sup>

1 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

2 船海智能装备与技术湖北省国际科技合作离岸中心, 湖北 武汉 430074

3 武汉市船海智能装备与技术“一带一路”联合实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要:** [目的] 针对现有水下机器人单次下潜难以兼顾大范围探测与高精度作业的痛点, 设计一款可变形水下作业机器人, 实现水深 1000 m 内的低阻巡航、双臂协同作业等功能, 满足海洋风电系统及水下油气平台等的巡检与维护需求。[方法] 首先, 明确机器人总体设计指标, 优化整体设计流程, 完成机器人舱体及设备布置, 设计变形机构(丝杆顶升机构)、耐压舱等关键结构, 并基于有限元分析完成 1000 m 水深对应的 12 MPa 压力下关键部位强度校核; 其次, 分析巡航模式下的续航能力与机动性能, 以及作业模式下的机械臂工作空间与稳定性; 最后, 通过 CFD 仿真验证阻力特性, 基于 Matlab 建立耦合动力学模型, 验证自恢复、抗扰动及手-艇耦合抑制性能。[结果] 所设计机器人内部总体布置合理, 关键部位满足 1000 m 深海作业要求, 耐压舱最大应力小于采用材料的屈服压力; 巡航模式下机器人极限续航为 7 h, 所搭载推进器能有效满足机器人水下灵活运动, 以 6 kn 速度航行时纵向阻力仅 -725.06 N, 各类工况下航行阻力明显低于作业模式, 具备低阻特性; 作业模式下中部浮力材料升起 270 mm, 重心与浮心高度差增加 0.054 m, 最大恢复力矩较巡航模式提升 202.1%, 机器人具备更高的作业稳定性, 其横倾自恢复时间从 180 s 缩短至 60 s, 同时具备更好的抗扰动能力, 双臂作业空间覆盖机体侧方、前方及下方区域, 协同作业空间有效。[结论] 通过自主形态切换, 提出的可变形水下作业机器人总体设计方案具备多任务的执行能力, 可实现巡航模式低阻探测与作业模式高稳作业的有机结合, 为深海复杂场景下的水下作业提供了新的方案。

**关键词:** 可变形水下机器人; 水下机器人-机械臂作业系统; 稳定性分析; 有限元分析; 计算流体力学

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04739

## 0 引言

海洋面积约占地球表面积的 70%, 蕴藏着丰富的矿产、油气和生物资源<sup>[1-2]</sup>。随着海洋资源的逐步开发利用, 人们逐渐加大水下无人系统的应用, 水下机器人作为水下无人系统的重要组成部分, 被广泛应用于水下环境探测、资源开发、水下设施运维等领域<sup>[3]</sup>。1957 年华盛顿大学研制出了第一款 AUV-SPURV, 其最大下潜深度为 3 600 m, 工作深度为 3 000 m<sup>[4]</sup>。在随后的几十年间, 水下机

器人领域取得了巨大进步。20 世纪末, 随着人类对海洋资源开发的认识逐渐加深, 诸多海洋强国逐步开展了水下作业机器人的研制, 其中典型的有美国夏威夷大学研制的“SAUVIM”<sup>[5]</sup>水下机器人、意大利热那亚大学研制的“MARIS”<sup>[6]</sup>等。近年来, 我国也开始加强水下作业机器人的研制, 并取得了一定的科研成果, 其中典型的有沈阳自动化研究所研制的“TYPE-R”<sup>[7]</sup>水下机器人等。

然而, 随着海洋资源的进一步开发, 水下各类复杂的应用场景要求水下机器人具备更强的作业

收稿日期: 2025-09-28 修回日期: 2026-01-12 网络首发时间: 2026-01-27 12:20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFB4710800); 国家自然科学基金重点项目(52131101); 华中科技大学“交叉研究支持计划”(2024JCYJ030); 湖北省国际科技合作项目(2023EHA024, 2024EHA030); 湖北省自然科学基金资助项目(2023AFB363)

作者简介: 张云飞, 男, 2001 年生, 硕士生。研究方向: 水下机器人设计与控制。E-mail: m202372613@hust.edu.cn

杨少龙, 男, 1988 年生, 博士, 副教授。海洋机器人智能控制及系统集成。E-mail: yangsl@hust.edu.cn

向先波, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶智能装备与系统, 海洋机器人。

E-mail: xbxiang@hust.edu.cn

\*通信作者: 杨少龙

\*\*第二通信作者: 向先波

性能。目前,经典流线型水下机器人通常采用回转体单浮筒结构,具有较小的流体阻力,常应用于水下远距离探测任务<sup>[8]</sup>,但由于其重心与浮心高度差(简称“重浮心高度差”)较小,易发生横摇,且内部空间有限,较难搭载机械臂等作业工具。框架型水下机器人由于其浮力材料安装于顶部,能够有效增加重浮心高度差,减少了机械臂作业时姿态耦合干扰,但其框架构型航行时所受水阻力较大,难以适应远距离、大范围的作业要求。结合这两类水下机器人优缺点,2007年美国伍兹霍尔海洋研究所研制了一种混合型水下航行器“Nereus”<sup>[9]</sup>,它有两种工作形态,能够以流线型构型进行大范围的调查,同时也可以工作在框架型构型,在机器人底部装配工作底盘,并在底盘上搭载机械手进行水下作业。但是,“Nereus”需要人为干预其变化形态,作业能力非常依赖水下机器人操作员的水平。

在此背景下,本文拟设计一款可变形的水下作业机器人,作为一种深海自主水下机器人来实现水下多功能作业的目标。不同于常规水下机器人,该可变形水下作业机器人将具备巡航与作业两种模式,并能够实现自主形态变化:当可变形水下作业机器人处于巡航模式时,能够以低阻力实现大范围航行探测;处于作业模式时,能够以高稳性实现高精度悬停作业。

# 1 总体设计目标及方法

## 1.1 任务需求及应用场景

如图1所示,本文所设计的可变形作业水下机器人能够广泛应用于海上风电系统及水下油气平台的巡检与维护。机器人能够基于不同任务变换形态:在巡航模式下能进行海底设施的巡检监测;在作业模式下针对海底设备进行相应的机械手作业<sup>[10]</sup>。

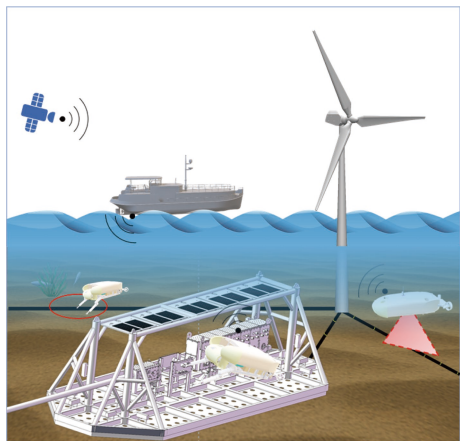


图1 作业场景图

Fig. 1 Operation scenario diagram

## 1.2 总体设计指标

可变形水下作业机器人设计指标如下:

- 1) 具备两种作业模式:巡航模式,作业模式。
- 2) 最大作业深度:1 000 m。
- 3) 最大巡航速度:5 kn;最大作业速度:2 kn。
- 4) 设计重量:≤800 kg。
- 5) 设计尺寸(长×宽×高):2 980 mm×1 200 mm×600 mm。
- 6) 续航时间:7 h@巡航模式;5 h@作业模式。
- 7) 最大作业能力:末端负载5 kg。

可变形水下作业机器人优势特色如下:

- 1) 具备两种作业模式,能够执行水下低阻巡航任务以及高精度机械臂作业任务;
- 2) 主动调整重浮心高度差,提高机器人的稳性,降低双机械臂作业时的耦合作用能力,并增强机器人的抗流能力;
- 3) 高集成度空间结构布局,多元感知传感器布置,实现空间利用及探测能力最大化。

## 1.3 设计优化流程

可变形水下作业机器人总体设计是一项系统性工作,如图2所示,本文设计以任务需求为导向,将机器人单航程下多任务执行作为其核心理念,首先完成机械机构设计及强度、流体分析,包括机器人外形轮廓设计;框架及耐压舱体设计;变形机构设计;传感设备、作业工具选型,

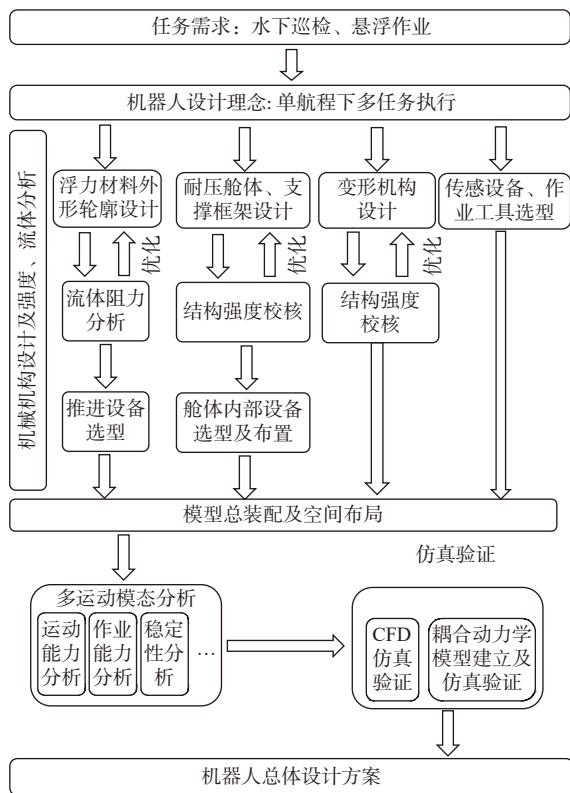


图2 总体设计流程图

Fig. 2 Overall design flowchart

并以流体计算结果为依据优化外形轮廓,结构校核结果优化舱体及框架设计。上述工作结束后,再进行总体装配并进行布局,获取重浮心、重量等基础参数。随后,进行可变形水下作业机器人多模态运动分析并进行仿真验证。最后,得出机器人总体设计方案。

### 1.4 功能形态分析

可变形作业水下机器人具备两种作业模式,如图 3 所示。当机器人处于巡航模式时,中部浮力材料落下,此时机器人整体呈流线型,具备较低的航行阻力,扩大机器人巡航范围;当机器人处于作业模式时,中部浮力材料升起,此时机器人整体重浮心高度差增大,能够降低机械臂作业时的手-艇耦合效应,便于水下高精度作业。其作用机理为:当机械臂作业时,作用于机器人本体的耦合力矩会导致机器人的纵倾角及横倾角发生变化,此时变形后机器人产生的作用于机器人

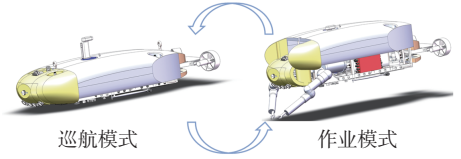


图 3 模式切换图

Fig. 3 Mode switching

上更大的恢复力矩,将使机器人更加快速恢复至初始纵倾角及横倾角。

## 2 主体设计及关键部位校核

### 2.1 总体布置

可变形水下作业机器人具备高集成度结构布局,各耐压舱体按照功能进行划分,可分为主控舱、通信舱、导航舱、动力舱、接驳盒及电池舱,各舱室布置如图 4 所示。同时,从图 4 可以看出本机器人搭载多种类型的传感设备,以获取其自身运动状态参数保障各项作业任务的完成。

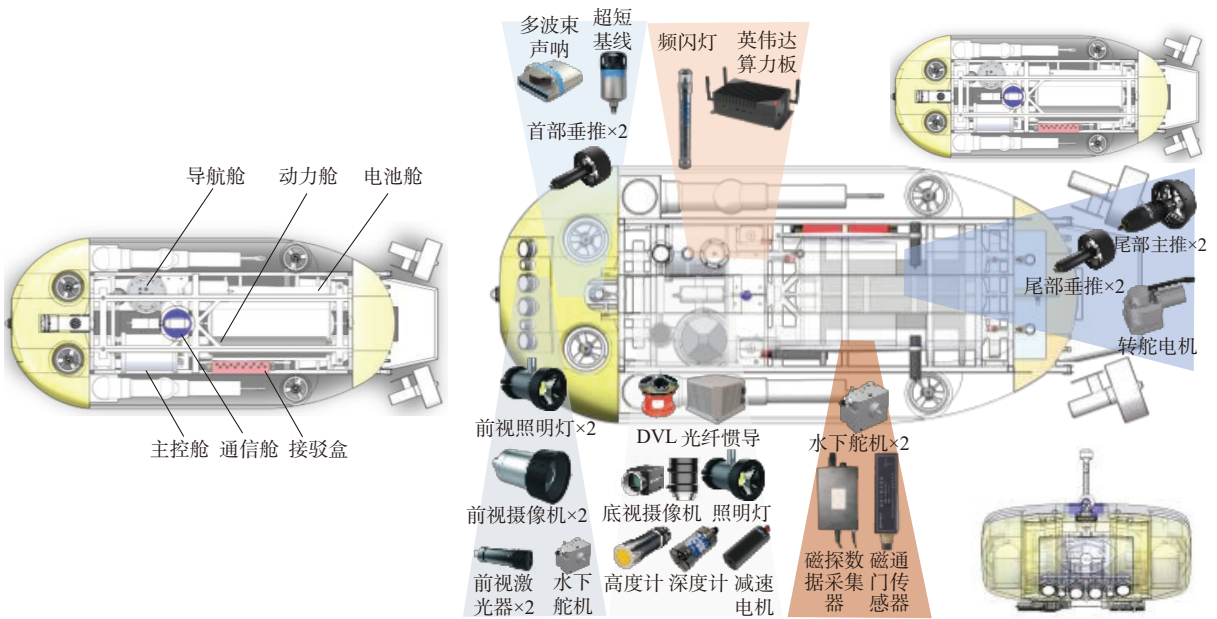


图 4 舱体及设备布置图

Fig. 4 Cabin and equipment layout diagram

### 2.2 关键机构设计

可变形水下作业机器人最为显著的特点便是在水中自主进行形态变化,形态变化的关键在于中部浮力材料的升降。本研究中,机器人浮力材料升降采用丝杆顶升机构,其结构图如图 5 所示。该机构整体由底部减速电机进行驱动,电机输出端与动力轴固连。在齿轮箱中装有精磨蜗杆和耐磨蜗轮。精磨蜗杆穿过动力轴并与其固连,从而随动力轴转动而转动。顶升螺杆穿过耐磨蜗轮并与其固连。精磨蜗杆带动耐磨蜗轮转动进而

带动顶升螺杆转动,将减速电机的旋转运动转化为顶升螺杆的转动。顶升管一端与金属框架通过螺栓固连,保证其无法转动,另一端与具有自锁功能的 T 形螺母固连,进而当减速电机转动带动顶升螺杆转动,使丝杆螺母上下移动从而推动中部浮力材料上下移动,最终实现机器人的变形功能。此外,在顶升机构四周设计了 4 根导向杆,提高机构整体的抗弯性能。

整个变形机构中,中部浮力材料设计运动速度为 2 mm/s,减速电机转速为 120 r/min,并得出丝杆螺母牙距为 4 mm。

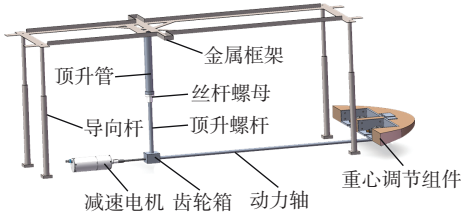


图5 变形机构设计图

Fig. 5 Morphing mechanism design diagram

同时在机构尾部设计了重心调节组件,包括配重块盒、尾部移动螺母和磁块。配重块盒通过尾部移动螺母与减速电机的动力轴连接,以在减速电机的带动下前后移动。磁块设置在配重块盒的内部,用于吸附外置的铁块以调整重心调节组件的重量。

本文所设计的机构结构简单、安装方便,适用于轴向和径向均为高承载场景。同时,丝杆顶升组件具有自锁功能,避免浮力材料升起后由于水流等因素影响出现晃动。丝杆顶升组件运动所需工作空间小、集成度高,减少航行器内部空间占用,便于主体框架内设备布置。此外,通过减速电机的复用,尾部重心调节机构既能避免机械臂作业而

产生重心前移的现象,还能够作为抛载使用。

### 2.3 关键部位校核

可变形水下作业机器人最大作业深度为1 000 m,因此需要对各耐压舱进行强度校核以验证所设计耐压舱体能够在预设深度下正常承压。所设计耐压舱采用7075-T6材质铝合金材料进行制造,其材料参数如表1所示。

表1 7075-T6 材料属性  
Table 1 7075-T6 material properties

材料参数	数值
泊松比	0.33
抗剪模量/(N·m <sup>-2</sup> )	2.69×10 <sup>10</sup>
弹性模量/(N·m <sup>-2</sup> )	7.20×10 <sup>10</sup>
屈服强度/(N·m <sup>-2</sup> )	5.05×10 <sup>8</sup>

最大作业深度1 000 m所对应的静水压力为10 MPa,同时考虑20%安全系数,因此对各舱室施加12 MPa均布载荷,对舱室进行网格划分,网格大小为7 mm,主要舱室校核结果如图6所示。

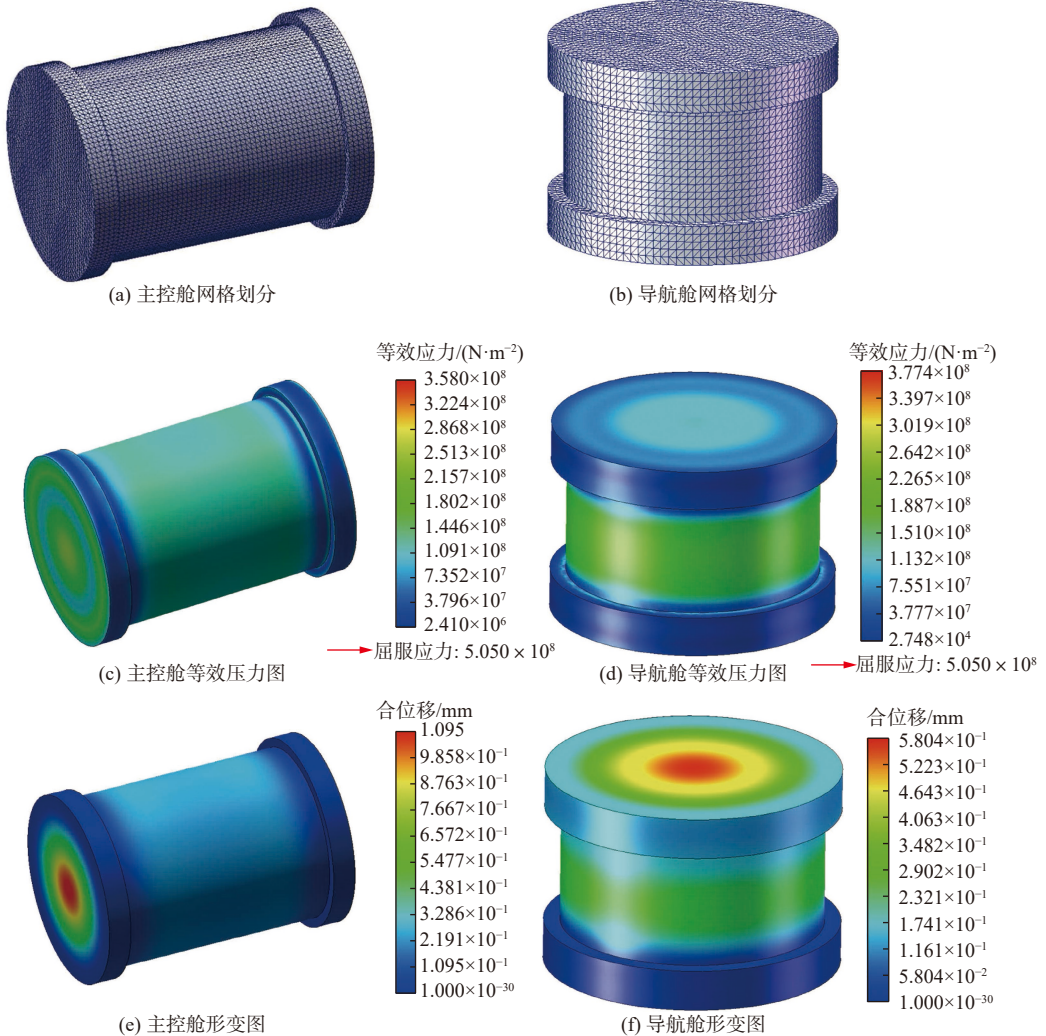


图6 耐压舱体强度校核图

Fig. 6 Pressure hull strength verification

从校核结果可以看出主控舱在 12 MPa 压力下的最大应力为 358 MPa, 小于材料的屈服应力 (505 MPa), 最大形变为 1.095 mm; 耐压舱在 12 MPa 压力下的最大应力 377 MPa, 小于材料的屈服应力 (505 MPa), 最大形变为 0.58 mm。因此所设计舱体满足实际使用需求。

### 3 运动模态分析

#### 3.1 巡航模式

##### 3.1.1 续航能力

可变形水下作业机器人共携带约 20 kW·h 容量电池, 其中: 电压等级 24 V, 电池容量为 3 kW·h 的用于各传感器以及控制系统供电; 电压等级 48V, 电池容量为 2 kW·h 的用于双机械臂供电; 电压等级 150 V, 电池容量为 15 kW·h 的用于推进器等大功率设备供电。由于在巡航模式下并不使用机械臂作业, 因此不考虑 48 V 供电。

根据作业需求, 机器人处于巡航模式时共有巡航工况、下潜工况、上升工况 3 个工况。本文统计机器人所搭载的各种传感器、动力设备的额定功耗, 结合具体航行工况, 将设备分为连续使用负载以及间歇使用负载, 并为设备设置使用系数(实际使用功耗/额定功耗)。基于机器人作业需求设置各工况作业时长, 最后可以得出可变形水下作业机器人在巡航模式下的续航能力, 如表 2 所示。机器人总巡航时长为 7h, 消耗 24 V 电池 2.67 kW·h, 消耗 150 V 电池 14.12 kW·h, 同时剩余

部分电量以应对应急状况。

表 2 巡航模式功耗分析

Table 2 Cruising mode power consumption analysis

	巡航 工况	上升 工况	下潜 工况	合计
工况作业时长/h	5	1	1	7
24 V总负载/W	500.40	94.52	84.14	679.06
150 V总负载/W	1 960.00	1 760.00	2 560.00	6 280.00
24 V电池所需容量/(kW·h)	2.50	0.09	0.08	2.67
150 V电池所需容量/(kW·h)	9.80	1.76	2.56	14.12

##### 3.1.2 高机动能力

为实现机器人巡航模式下的高机动能力, 机器人共搭载 6 个推进器, 含 4 个垂直推进器、2 个水平推进器, 其布置形式如图 7 所示。

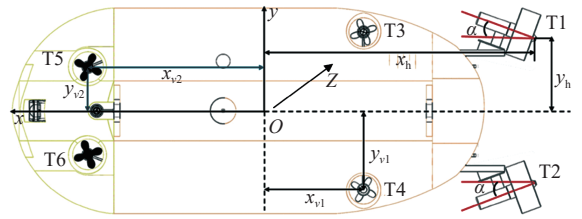


图 7 推进器布置图

Fig. 7 Thruster layout diagram

其中 T1, T2 为水平推进器, 其额定推力为 48 kg; T3, T4, T5, T6 为垂直推进器, 其额定推力为 20 kg; 点 O 为机器人重心处, T1, T3, T5 与 T2, T4, T6 关于 x 轴对称。根据推进器布置, 所建立推力分配矩阵如式(1)所示。

$$\tau = \mathbf{B}(\alpha) \times \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & y_{v1} & -y_{v1} & y_{v2} & -y_{v2} & 0 \\ 0 & x_{v1} & x_{v1} & -x_{v2} & -x_{v2} & 0 \\ \cos \alpha \times y_h + \sin \alpha \times x_h & -\cos \alpha \times y_h - \sin \alpha \times x_h & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \mathbf{T} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为推进器推力方向与中垂面夹角(能够根据实际情况调整);  $x_{v1}$  为 T3, T4 推进器轴到 yz 平面垂直距离;  $x_{v2}$  为 T1, T2 推进器轴到 yz 平面垂直距离;  $x_h$  为 T1, T2 推进器末端点至 yz 平面垂直距离;  $y_h$  为 T1, T2 推进器末端点至 yz 平面垂直距离;  $\mathbf{T}$  为各推进器推力。

根据本机器人的推力分配矩阵, 以及推进器的最大输出, 采用蒙特卡洛随机采样法, 建立机器人可达推力及可达力矩图。同时考虑机器人水平面与垂直面控制, 建立可达推力/力矩三维图。

由水平面控制下推进器可输出推力/力矩图(图 8(a))可见, 机器人具备多样纵向力与偏航力矩组合模式, 完全满足机器人在水平面运动过程

中路径跟踪, 灵活避障需要。图 8(b)所示为垂直平面控制下推进器可输出推力/力矩图, 不难看出其纵向力、垂向力及纵倾力矩协同输出范围广、组合灵活, 能够高效满足机器人巡航模式下的深度跟踪控制等运动需求。

### 3.2 作业模式

#### 3.2.1 工作空间分析

可变形水下作业机器人搭载双臂机械手, 具有较大的作业空间范围, 功能满足复杂作业任务需求<sup>[11]</sup>。实际作业过程中, 机械臂的工作空间是评估其工作性能优劣的重要指标。同时, 也需要明确机械臂实际的工作范围, 从而明确机器人在

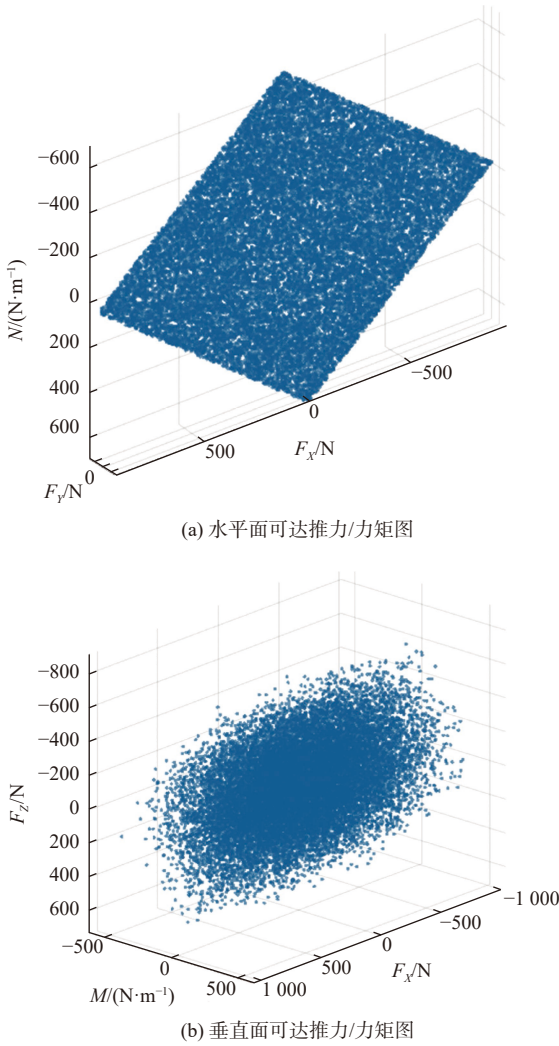


图 8 可达推力及可达转矩图

Fig. 8 Achievable thrust and achievable torque

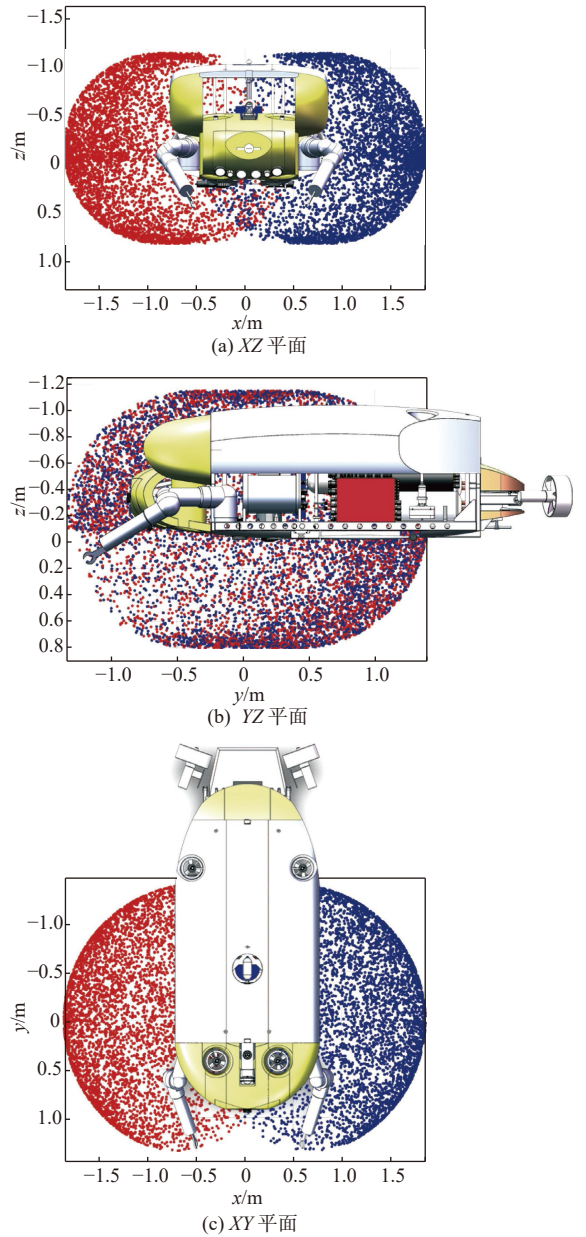
作业模式下需要到达的期望位置。本文基于改进 D-H 法建立机械臂的正运动学模型, 并采用蒙特卡洛随机采样的方法, 进行机械臂工作空间的可视化<sup>[12]</sup>。根据机械臂实际安装位置, 机械臂关节角范围如表 3 所示。机械臂工作空间范围如图 9 所示, 图中所示坐标系包括惯性坐标系、机器人本体坐标系、机械臂基坐标系及各关节坐标系。

图 9 中展示了双臂机械手在基准坐标系(图 9 坐标系定义所示)下的三维可达作业空间分布, 左右机械臂的末端可达区域分别以蓝色与红色点云表示。由空间作业图可见, 双臂机械手在  $x$  轴方向可达范围为  $-1.8 \sim 1.8$  m,  $y$  轴方向可达范围为  $-1.4 \sim 1.4$  m,  $z$  轴方向可达范围为  $-1.2 \sim 0.8$  m,

表 3 机械臂关节限位

Table 3 Manipulators' joint limits

	关节角1 (回转关节)	关节角2 (回转关节)	关节角3 (偏转关节)	关节角4 (回转关节)
左机械臂	$0^\circ, 150^\circ$	$-110^\circ, 0^\circ$	$-110^\circ, 110^\circ$	$-180^\circ, 180^\circ$
右机械臂	$-150^\circ, 0^\circ$	$0^\circ, 110^\circ$	$-110^\circ, 110^\circ$	$-180^\circ, 180^\circ$



惯性坐标系

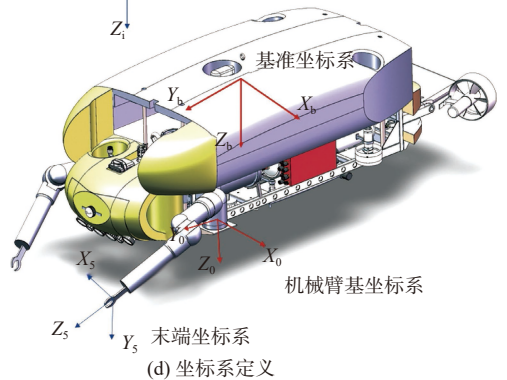


图 9 机械臂作业空间图

Fig. 9 Manipulators' workspace diagram

整体作业空间覆盖了机体侧方、前方以及一定的下方区域, 各机械臂具备较大的独立作业范围。同时点云在  $x$  轴方向约  $-0.5 \sim 0.5$  m,  $z$  轴方向约为  $0 \sim 0.6$  m 处产生重叠区域, 即双臂机械手可协

同作业空间,该协同空间使机器人能够在其前方区域进行有效协同操作。

### 3.2.2 稳定性分析

对于本研究设计机器人而言,当中部浮力材料升高时,机器人整体重浮心高度差增加,因此在同样纵倾角或者横倾角下,作业模式形态下的机器人具有更大恢复力矩,因此能够有效降低机械臂作业时引起的耦合效应。以下为作业模式下,机器人稳定性分析。

将可变形水下作业机器人分为 a, b 两部分,其中 a 为机器人本体, b 为中部能够升起的浮力材料。a 重量为  $M_a$ , 水中浮力为  $B_a$ ; b 重量为  $M_b$ , 水中浮力为  $B_b$ 。初始状态时, a 重心坐标  $(x_a, y_a, z_a)$ , 浮心坐标  $(x_{Ba}, y_{Ba}, z_{Ba})$ ; b 重心坐标  $(x_b, y_b, z_b)$ , 浮心坐标  $(x_{Bb}, y_{Bb}, z_{Bb})$ 。

假定机器人在水中为零浮力状态,即  $B_a + B_b = (M_a + M_b) \times g$ , 机器人整体在水中保持静止。当机器人完成变形,即 b 部分升高  $h$ , 则 b 部分重心和浮心坐标变化为  $(x_b, y_b, z_b + h)$  和  $(x_{Bb}, y_{Bb}, z_{Bb} + h)$ , a 重心坐标和浮心坐标保持不变。

在本节中,定义  $z$  轴方向为垂直于水平面向上,仅探究机器人重浮心在  $z$  轴方向的高度差变化,根据重浮心坐标公式<sup>[3]</sup>,变形前机器人整体  $z$  轴方向上的重心  $Z_M$  和浮心坐标  $Z_B$  如下:

$$Z_M = \frac{M_a \times z_a + M_b \times z_b}{M_a + M_b} \quad (2)$$

$$Z_B = \frac{B_a \times z_{Ba} + B_b \times z_{Bb}}{B_a + B_b} \quad (3)$$

变形前,其重浮心高度差  $\Delta$  如下:

$$\Delta = Z_B - Z_M \quad (4)$$

当 b 升高  $h$  距离后,机器人整体  $z$  轴方向上的重心  $Z'_M$  和浮心坐标  $Z'_B$  如下

$$Z'_M = \frac{M_a \times z_a + M_b \times (z_b + h)}{M_a + M_b} = Z_M + \frac{M_b \times h}{M_a + M_b} \quad (5)$$

$$Z'_B = \frac{B_a \times z_{Ba} + B_b \times (z_{Bb} + h)}{B_a + B_b} = Z_B + \frac{B_b \times h}{B_a + B_b} \quad (6)$$

变形后,其重浮心高度差  $\Delta'$  如下:

$$\Delta' = Z'_B - Z'_M \quad (7)$$

因此,机器人变形前后重浮心高度差变化量如下:

$$\Delta' - \Delta = h \times \left( \frac{B_b}{B_a + B_b} - \frac{M_b}{M_a + M_b} \right) \quad (8)$$

由于机器人在水中处于零浮力状态,且所选

浮力材料其密度为  $400 \text{ kg/m}^3$ , 因此在水中  $B_b \times h > M_b \times h \times g$ , 那么  $\Delta' - \Delta > 0$ , 即变形后机器人的重浮心高度差增加,更加有利于水下作业稳定,且重浮心高度差变化量与浮力材料上升高度和自身体积有关。

假定机器人在水中一直处于平衡状态,且处于零浮力状态,即  $M \times g = B$ 。变形前重浮心高度差为  $\Delta$ , 变形后重浮心高度差为  $\Delta'$ 。当机器人发生姿态变化时,其重浮心相对位置发生变化,机器人所受重力与浮力产生作用于机器人上的恢复力矩,使机器人克服姿态变化,恢复至初始姿态。以机器人仅发生纵倾为例,其纵倾角为  $\theta$ , 变形前后恢复力矩增量表达式如下:

$$\Delta W_y = W'_y - W_y = -M \times g \times \sin \theta \times (\Delta' - \Delta) = -\sin \theta \times h \times (B_b - M_b \times g) \quad (9)$$

同理,机器人仅发生横倾时,其横倾角为  $\varphi$ , 变形前后恢复力矩增量表达式如下:

$$\Delta W_x = -\sin \varphi \times h \times (B_b - M_b \times g) \quad (10)$$

通过上述分析,可以看出,变形前后恢复力矩增量依然是与浮力材料上升高度和自身体积有关。通过三维建模软件得出可变形水下作业机器人质量属性,其中 a 部分重量为  $650 \text{ kg}$ , 水中浮力为  $4900 \text{ N}$ ; b 部分重量为  $100 \text{ kg}$ , 水中浮力为  $2450 \text{ N}$ 。根据上述数据可得出仅发生横倾情况下,恢复力矩增量随浮力材料上升高度和横倾角变化的曲面图,如图 10 所示。

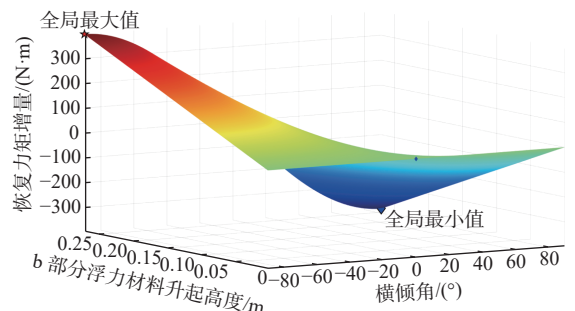


图 10 恢复力矩增量变化曲面图

Fig. 10 Surface plot of restoring moment increment

由图 10 可知,恢复力矩增量的全局最大值出现在浮力材料升高高度  $270 \text{ mm}$ , 横倾角度为  $-90^\circ$ ; 恢复力矩增量的全局最小值出现在浮力材料升高高度  $270 \text{ mm}$ , 横倾角度为  $90^\circ$  (其中恢复力矩增量正负代表其方向不同)。同时在横倾角相同时,随着浮力材料升高高度  $h$  增加,恢复力矩增量的绝对值也在增加。由此可以看出,随着浮力材料升高高度  $h$  增加,机器人的作业稳定性也在逐步增加。b 部分升起高度为  $270 \text{ mm}$ 。代入上述算式可

得出,变形前后重浮心高度差变化量为 0.054 m。同时以仅发生横倾为例,其变形前后恢复力矩增量如下:

$$\Delta W_x = -396.6 \times \sin \varphi \quad (11)$$

可以看出,其变形前后恢复力矩增量绝对值最大为 396.9 N·m(横倾 90°),相较于巡航模式下最大恢复力矩增加 202.1%。

## 4 仿真验证

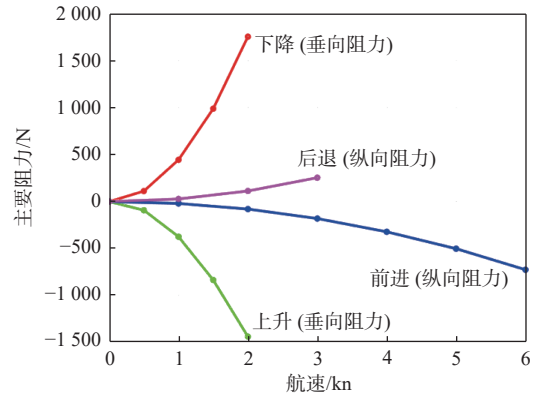
### 4.1 CFD 仿真结果

为了解可变形水下作业机器人航行过程所受航行阻力,同时校核所选推进器是否合理,因此进行可变形水下作业机器人巡航模式和作业模式的 CFD 仿真。

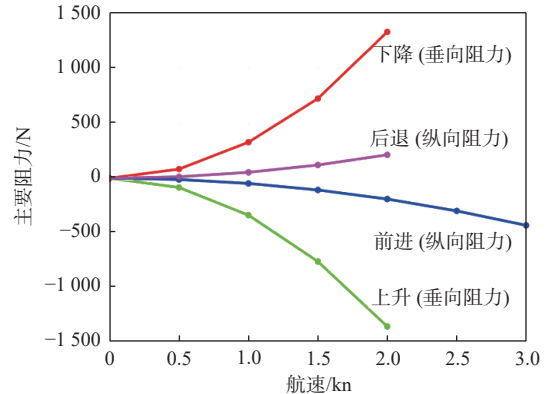
计算域范围如下:机器人前方速度入口距机器人首部距离、压力出口距机器人尾部距离为机器人总长的 3 倍,上下左右速度入口距机器人中轴线的距离均为机器人总长的 2 倍。在整个计算流程中,坐标系以机器人浮心作为原点,定义  $Ox$  轴沿机器人纵向向前为正,  $Oy$  轴正方向指向机器人的左舷,  $Oz$  轴垂直于  $Oxy$  平面指向上为正,其中纵向阻力指沿  $Ox$  轴方向阻力,垂向阻力指沿  $Oz$  轴方向阻力。下文计算阻力值为正表明阻力方向指向各方向轴正方向,阻力值为负表明阻力方向指向各方向轴负方向。

巡航形态下,计算机器人前进过程中,分别以 1, 2, 3, 4, 5, 6 kn 航行;机器人上升及下降过程中,分别以 1, 2, 3 kn 航行。机器人后退过程中,分别以 1, 2, 3 kn 航行。设定计算域并进行网格划分,整体网格数量为 200 万。作业形态下,计算机器人前进过程中,分别以 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kn 航行;机器人后退过程中,分别以 0.5, 1, 1.5, 2 kn 航行;机器人上升及下降过程中,分别以 0.5, 1, 1.5, 2 kn 航行。设定计算域并进行网格划分,整体网格数量为 100 万。计算结果如图 11 所示。

由图 11 可以看出,当机器人处于巡航模式时:以 6 kn 速度完成前进工况,所受到的纵向阻力为 -725.06 N;机器人以 2 kn 速度完成上升和下降工况时,所受的垂向阻力为 -1 437.7 N 和 1 757.07 N;机器人以 1 kn 速度完成上升和下降工况时,所受的垂向阻力为 -373.57 N 和 445.181 N。当机器人处于工作模式时:机器人以 3 kn 前进时,所受到的纵向阻力为 -428.783 N;以 2 kn 后退时,所受到的纵向阻力为 212.728 N;以 1 kn 上升时,所受到的垂向阻力为 -336.391 N;以 1 kn 下降



(a) 巡航模式航行阻力



(b) 作业模式航行阻力

图 11 阻力计算图

Fig. 11 Resistance calculation curves

时,所受到的垂向阻力为 327.525 N。巡航状态下以 3 kn 前进时所受纵向阻力为 -180.18 N,明显低于工作状态下以同样速度航行的阻力,且工作状态下上升或下潜所受阻力和巡航状态大致相同。

结合机器人作业任务需求,巡航模式下最大前进速度为 6 kn,最大上升速度为 1 kn。在工作模式下推进器主要功能是维持机器人姿态稳定,因此对于推进器的选型主要考虑巡航模式下各航行工况的航行阻力。巡航模式下,6 kn 速度完成前进工况时,所受到的纵向阻力为 -725.06 N,同时考虑 20% 的推力减额系数,所选水平推进器额定推力为 48 kg,则两个水平推进器能够提供纵向推力为 768 N;1 kn 速度完成上升和下降工况时,所受垂向阻力为 -373.57 N 和 445.181 N,考虑推进器的 20% 推力减额系数,所选垂直推进器额定推力为 20 kgf,则 4 个垂直推进器能够提供垂向推力为 640 N。因此所选推进器能够满足各项任务需求。

## 4.2 耦合动力学模型建立及仿真验证

### 4.2.1 耦合动力学模型

#### 1) 机械臂耦合动力学模型。

可变形水下作业机器人搭载双机械臂进行水下作业,建立机械臂-水下机器人(手-艇)耦合动

力学模型,进行耦合系统动力学仿真,深入研究机械臂作业时对机器人姿态和位置的扰动,并基于仿真结果优化控制算法,降低实际机器人调试成本,并有效规避实际作业风险。

水下机械臂在水下运动过程中,各连杆还会受到水阻力、附加质量力以及浮力等因素的影响。同时,机械臂基座具有由机器人运动诱发的耦合速度及加速度。因此在本文中,采用牛顿-欧拉法并考虑水阻力、附加质量力以及浮力建立机械臂动力学模型<sup>[14-15]</sup>。机械臂动力学模型为

$$\mathbf{M}_m(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{M}_{vm}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{vm}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{v}) + \mathbf{D}_{vm}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{v}) + \mathbf{G}_{vm}(\mathbf{q}, \eta_{v2}) + \mathbf{F}_m(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{J}_{ee}(\mathbf{q})\mathbf{T}_{ee} = \boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\tau}_{dm} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{M}_m(\mathbf{q})$ 为机械臂的惯性矩阵;  $\mathbf{M}_{vm}(\mathbf{q})$ 为基座诱发的耦合加速度下机械臂的耦合惯性矩阵;  $\mathbf{C}_{vm}$ 为耦合速度下,机械臂各关节所受科氏-向心力矩;  $\mathbf{D}_{vm}$ 为耦合速度下,机械臂各关节所受水阻力矩;  $\mathbf{G}_{vm}$ 为机械臂各关节所受重浮力矩;  $\mathbf{F}_m$ 为机械臂各关节所受摩擦力矩;  $\mathbf{J}_{ee}\mathbf{T}_{ee}$ 为机械臂末端受力转换至机械臂各关节力矩;  $\boldsymbol{\tau}_m$ 为机械臂关节电机驱动力矩;  $\boldsymbol{\tau}_{dm}$ 为机械臂各关节所受到的外界扰动项。

## 2) 可变形水下作业机器人耦合动力学模型。

一般水下机器人六自由度动力学模型如下所示:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 为水下机器人质量矩阵和附加质量矩阵;  $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 为水下机器人科氏力及向心力矩阵和附加科氏力及向心力矩阵;  $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 为水下机器人所受水阻力矩阵;  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 为水下机器人重浮心产生的恢复力矩;  $\boldsymbol{\tau}$ 为水下机器人推进器及舵产生的控制力和力矩;  $\boldsymbol{\tau}_d$ 为水下机器人所受外界扰动项。

由于可变形水下作业机器人搭载双机械臂,机械臂作业过程中会对机器人产生扰动。其扰动项,通过机械臂动力学推导能够获得机械臂基座处所受到的六自由度力和力矩,基座处与机器人固连,则固连处所受力和力矩与基座处所受力和力矩大小相等,方向相反。已知机械臂固连处所受力和力矩可将其等效变换至机器人重心处<sup>[16]</sup>。

将可变形水下作业机器人耦合效应下六自由度耦合动力学方程写成如下形式:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d + \boldsymbol{\tau}_c \quad (14)$$

式中,  $\boldsymbol{\tau}_c$ 为双臂作业作用于艇体的耦合力和耦合力矩。

同时,可变形水下作业机器人耦合效应下六自由度耦合动力学方程中,各矩阵参数能够通过水动力仿真结果拟合得到。

## 4.2.2 仿真验证

根据上述所建立的耦合动力学模型,在本节中将基于 Matlab 完成可变形水下作业机器人的仿真验证,包括静水环境下的机器人自恢复能力仿真验证、外界扰动下机器人抗扰动能力验证、手-艇耦合效应验证。

### 1) 自恢复能力。

假设:机器人初始状态静止,且在动作过程中不受外界扰动,在初始状态下,机器人的横倾角为  $30^\circ$ ,将所设计机器人巡航模式与作业模式进行对比仿真分析,其结果如图 12 所示。

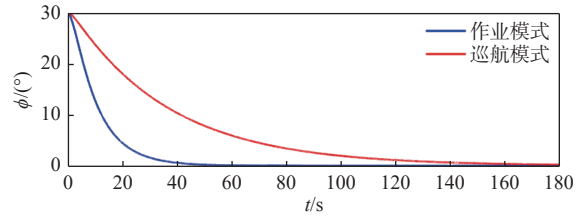


图 12 横倾自恢复图

Fig. 12 Roll self-recovery curves

从图 12 中可以看出,当初始横倾角为  $30^\circ$  时,由于作业模式下机器人具备更大的重浮心高度差,因此作业模式下机器人的纵倾角恢复反应速度更快。同时,在自恢复的过程中,作业模式下能够更加平稳更加快速趋近稳态。作业模式下,机器人在 60 s 时趋于稳定,而巡航模式下在 180 s 时才趋于稳定。可以看出,作业模式下机器人由于更大的重浮心高度差,具备更强自恢复能力。

### 2) 抗扰动能力。

当机器人进行水下作业时,会受到环境扰动,因此其抗扰动能力十分重要,为验证可变形水下作业机器人在作业模式下是否具备更强的抗扰动能力,将其在受到相同扰动下的运动情况进行对比仿真分析。

假设:机器人初始状态静止,位置与姿态均为 0,所受扰动向量为

$$[0, 0, 0, 10 + 20 \times \sin(0.2 \times t), 10 + 20 \times \cos(0.2 \times t), 0]^T$$

其结果如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,当水下机器人受到时变的横倾力矩以及纵倾力矩时,由于机器人自身各自由度运动的相互耦合,会使机器人本体在各自由度上都有扰动影响。将作业模式与巡航模式进行对比,可以看出,作业模式下,机器人的横倾角变化中虽然峰值更大,但是能够更加快速地恢复稳定;纵倾角变化过程中,峰值更小且动态过程更加平稳。同时机器人纵倾角及横倾角的变化导致其他四自由度的耦合运动,但作业模式下机器

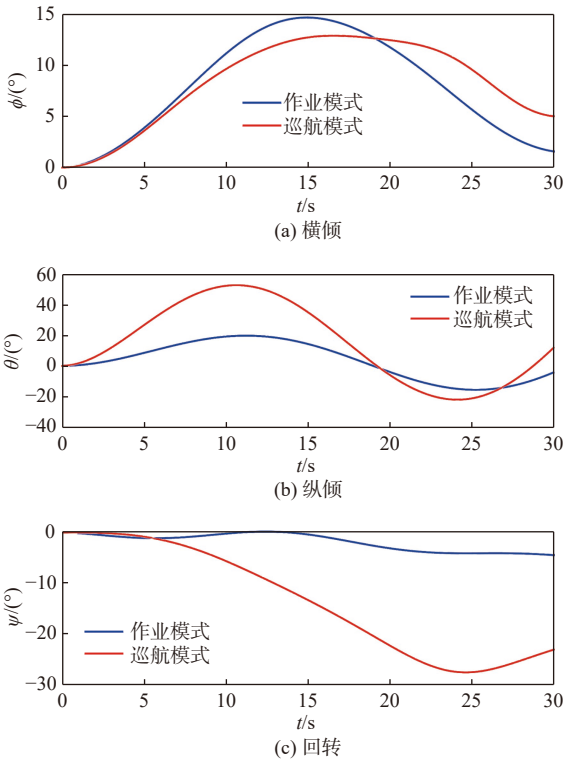


图 13 机器人抗扰动图

Fig. 13 Robot anti-disturbance curves

人的运动幅度均明显小于巡航模式。

### 3) 手-艇耦合效应。

结合 4.2.1 所建立的耦合动力学模型, 进行双臂运动下艇体耦合效应仿真分析。

在此仿真工况下, 假设机器人初始状态静止, 位置与姿态均为 0。双臂末端均不搭载重物, 左臂各关节的期望角度为  $[5\pi/6, \pi/2, \pi/2, \pi/2]$ , 右臂各关节的期望角度为  $[-5\pi/6, -\pi/2, -\pi/2, -\pi/2]$ , 并采用五次多项式插值法进行轨迹规划, 仿真时间 10 s, 其中左右臂初始关节角均为 0, 左右臂初始及末端角速度均为  $0 \text{ s}^{-1}$ , 左右臂初始及末端角加速度均为  $0 \text{ s}^{-2}$ 。仿真结果如图 14 所示。

从图 14 中可以看出, 当机械手作业时, 对于艇体的耦合效应主要集中于  $x$  轴方向, 机器人本体对于其他自由度的耦合效应具有较强的抑制作用。同时在机器人位置搭载大功率水平推进器, 因此当机械臂作业时, 艇体能够利用尾部推进器有效抑制耦合效应导致艇体本身的运动, 保障水下高精度作业。

## 5 结语

为实现水下机器人单航程下完成多种作业任务, 本文设计了一款可变形水下作业机器人, 并完成了该机器人的机械结构设计、总体布局优化、关键强度校核, 不同模式下的作业性能分析,

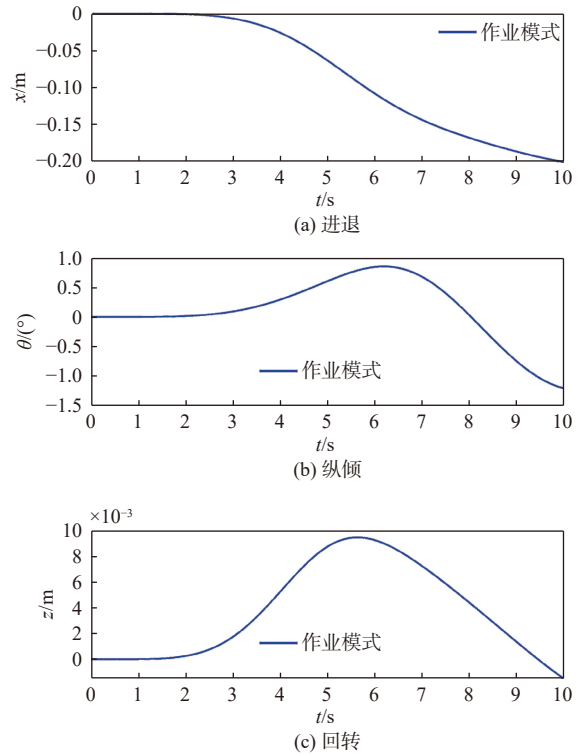


图 14 手-艇耦合图

Fig. 14 Manipulator-vehicle coupling effect diagram

以及仿真环境下的性能验证。同时, 还实现了该机器人在巡航模式下的低阻力特性, 作业模式下的强抗扰动及自恢复能力, 为深海环境下的机器人设计提供了一种新的思路。

目前, 所设计的可变形水下作业机器人已完成其总体设计, 但仍处于建造阶段, 因此其实际作业性能分析还处于理论研究阶段, 尚未进行实艇试验。后续还将通过样机测试验证耦合动力学模型及仿真结果的准确性。同时, 在本文所验证的可变形水下作业机器人的抗扰动能力并未引入环境的影响, 例如海流等因素, 也需要在后续进行更加深入的研究。

### 参考文献:

- [1] 王观道, 向先波, 李锦江, 等. 面向过驱动 UUV 推进器容错控制的非线性观测自适应推力分配 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 175-183.  
WANG G D, XIANG X B, LI J J, et al. Nonlinear observer-based adaptive thruster allocation for thruster fault tolerant control of over-actuated UUV[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 175-183 (in Chinese).
- [2] ZEREIK E, BIBULI M, MIŠKOVIĆ N, et al. Challenges and future trends in marine robotics[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 46: 350-368.
- [3] 李硕, 刘健, 徐会希, 等. 我国深海自主水下机器人的研究现状 [J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1152-

- 1164.
- LI S, LIU J, XU H X, et al. Research status of autonomous underwater vehicles in China[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2018, 48(9): 1152–1164 (in Chinese).
- [4] 孟繁贵, 刘爱民, 胡岩, 等. 自治水下机器人及其运动控制技术综述 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(11): 321–338.
- MENG F G, LIU A M, HU Y, et al. Overview of autonomous underwater vehicles and their motion control technologies[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(11): 321–338 (in Chinese).
- [5] YUH J, CHOI S K, IKEHARA C, et al. Design of a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions (SAUVIM)[C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Underwater Technology. Tokyo: IEEE, 1998: 63–68. DOI:10.1109/UT.1998.670059.
- [6] SIMETTI E, WANDERLINGH F, TORELLI S, et al. Autonomous underwater intervention: experimental results of the MARIS project[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(3): 620–639.
- [7] 张奇峰, 张艾群. 自治水下机器人机械手系统协调运动研究 [J]. 海洋工程, 2006, 24(3): 79–84.
- ZHANG Q F, ZHANG A Q. Research on coordinated motion of an autonomous underwater vehicle-manipulator system[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(3): 79–84 (in Chinese).
- [8] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27–44.
- SONG B W, PAN G, ZHANG L C, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 27–44 (in Chinese).
- [9] 徐鹏飞. 11 000 米 ARV 总体设计与关键技术研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2014.
- XU P F. Research on system design and key technology of ARV with full ocean depth[D]. Beijing: China Ship Scientific Research Center, 2014 (in Chinese).
- [10] 王向宇. 水下生产系统控制模块对接定位机构研究及可靠性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.001004.
- WANG X Y. Research on the docking-positioning mechanism and reliability of the control module for the subsea production system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.001004 (in Chinese).
- [11] 李新宇, 邹纫秋, 董恂, 等. 受限空间下双冗余臂机器人最优轨迹规划方法 [J]. 航天器环境工程, 2023, 40(2): 134–140.
- LI X Y, ZOU R Q, DONG Q, et al. Optimal trajectory planning method for dual-arm robot in constrained space[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2023, 40(2): 134–140 (in Chinese).
- [12] 徐振邦, 赵智远, 贺帅, 等. 机器人工作空间求解的蒙特卡洛法改进和体积求取 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2703–2713.
- XU Z B, ZHAO Z Y, HE S, et al. Improvement of Monte Carlo method for robot workspace solution and volume calculation[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 2703–2713 (in Chinese).
- [13] SAKAGAMI N, SHIBATA M, KAWAMURA S, et al. An attitude control system for underwater vehicle-manipulator systems[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, AK: IEEE, 2010: 1761–1767. DOI:10.1109/ROBOT.2010.5509800.
- [14] 常宗瑜, 张扬, 郑方圆, 等. 水下机器人-机械手系统研究进展: 结构、建模与控制 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 53–69.
- CHANG Z Y, ZHANG Y, ZHENG F Y, et al. Research progress of underwater vehicle-manipulator systems: configuration, modeling and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 53–69 (in Chinese).
- [15] 韩寒. 水下机器人-机械手系统建模和协调运动控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.001899.
- HAN H. Modelling and coordinated motion control of underwater vehicle-manipulator systems[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.001899 (in Chinese).
- [16] XIONG X Y, XIANG X B, WANG Z, et al. On dynamic coupling effects of underwater vehicle-dual-manipulator system[J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111699.

# Overall design and operational analysis of a morphable underwater intervention robot

ZHANG Yunfei<sup>1</sup>, YANG Shaolong<sup>\*\*1,2,3</sup>, WU Dingyi<sup>1</sup>, XIANG Xianbo<sup>\*\*1,2,3</sup>

1 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2 International Science and Technology Cooperation Offshore Center for Ship and Marine Intelligent Equipment and Technology, Wuhan 430074, China

3 Wuhan Belt & Road Joint Lab of Ship and Marine Intelligent Equipment and Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** [ **Objective** ] To address the inherent trade-off between large-scale exploration and high-precision manipulation in existing underwater vehicles, a novel morphable underwater intervention robot is developed. Designed for operations at depths of up to 1 000 m, the robot integrates low-drag cruising with dual-arm collaborative capabilities, meeting the stringent inspection and maintenance requirements of offshore wind farms and subsea oil and gas platforms. [ **Method** ] The overall design specifications were first established, followed by the optimization of the integrated design workflow. The configuration of the robot's pressure-resistant hulls and equipment layout were finalized, with the development of key components, including the morphing mechanism (lead screw lifting mechanism) and pressure-resistant hulls. Strength verification of key components was performed using finite element analysis (FEA) under a 12 MPa hydrostatic load, simulating a depth of 1 000 m. Subsequently, the endurance and maneuverability during cruising mode, as well as the manipulator workspace and stability during manipulating mode, were systematically evaluated. Finally, hydrodynamic drag characteristics were verified through CFD simulations, and a coupled vehicle-manipulator dynamic model was developed in Matlab to validate the robot's self-recovery, disturbance rejection, and coupling suppression performance. [ **Results** ] The results indicate that the internal layout is rational, with critical components meeting the operational requirements for 1 000 m deep-sea environments. The maximum stress within the pressure hulls remains below the yield strength of the selected materials. In cruising mode, the robot achieves a maximum endurance of 7 h, and the configured propulsion system ensures high underwater maneuverability. At a cruise speed of 6 kn, the longitudinal drag is recorded at only 725.06 N, significantly lower than that in manipulating mode, demonstrating superior low-drag characteristics. In manipulating mode, the central buoyancy module is raised by 270 mm, increasing the vertical distance between the center of gravity and the center of buoyancy by 0.054 m. As a result, the maximum restoring moment increases by 202.1% compared to cruising mode, significantly enhancing operational stability. The heeling self-recovery time is reduced from 180 s to 60 s, alongside improved anti-disturbance capabilities. Furthermore, the dual-arm workspace effectively covers the lateral, forward, and downward regions of the vehicle, ensuring an efficient and collaborative operational envelope. [ **Conclusion** ] By utilizing autonomous configuration switching, an overall design scheme for a morphable underwater intervention robot with multi-task execution capability was proposed. This design effectively combines low-resistance detection in cruising mode with high-stability operation in manipulating mode, offering an innovative solution for underwater operations in complex deep-sea scenarios.

**Key words:** morphable underwater robot; underwater vehicle-manipulator system; stability analysis; finite element method; computational fluid dynamics