

文章编号: 1007-7294(2025)04-0535-12

带缆遥控水下机器人在海流环境下的水动力性能与运动控制研究

窦义哲^{1,2}, 吴家鸣², 董志强¹, 杨显原², 韩翔希³

(1. 深海智人(广州)技术有限公司研发中心, 广州 511466; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641; 3. 北部湾大学 机械与船舶海洋工程学院, 广西 钦州 535011)

摘要: 采用重叠网格与滑移网格相结合的方法, 研究在有来流情况下水下机器人的水动力性能和运动控制, 通过运用 PID 控制方法对脐带缆和导管螺旋桨进行联合操纵, 能够实现来流情况下的垂向升沉运动以及来流变化情况下水下机器人的深度保持, 通过 PID 方法对尾部螺旋桨进行控制能够较好地调整水下机器人的纵倾角, 实现定深情况下机器人姿态接近平衡, 也能在升沉运动的复杂工况下使水下机器人全程保持给定的纵倾角度。

关键词: 水下机器人; 导管螺旋桨; 水动力; PID 控制; 姿态控制

中图分类号: TV131.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.04.003

Hydrodynamic performance and motion control of underwater robot in incoming flow

DOU Yi-zhe^{1,2}, WU Jia-ming², DONG Zhi-qiang¹, YANG Xian-yuan², HAN Xiang-xi³

(1. R & D Center, Sealien Robotics Ltd., Guangzhou 511466, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. School of Mechanical and Marine Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: The method of combining overlapping grid and sliding grid was applied to study the hydrodynamic performance and motion control of an underwater robot under incoming flow. The PID (Proportional, Integral, Differential) control method was used to realize the vertical heave motion under the presence of incoming flow through the joint operation of the umbilical cable and the ducted propeller, and the depth of the underwater robot was maintained under the condition of incoming flow change. The trim angle of the underwater robot could be adjusted by the propeller though PID method, maintaining the attitude close to balance at a fixed depth. Also the underwater robot can keep its trim angle constant throughout the entire movement process under the complicated heave working conditions.

Key words: underwater robot; ducted propeller; hydrodynamic; PID control; attitude control

收稿日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51979110); 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1406602); 南沙区重点领域科技计划资助项目(2024ZD011)

作者简介: 窦义哲(1988-), 男, 博士, E-mail: douyizhedl@163.com;

吴家鸣(1957-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ctjmwu@scut.edu.cn。

0 引言

带缆遥控水下机器人通常由作为搭载传感器腔体的机器人主体、若干导管螺旋桨和脐带缆组成。操作人员可以通过脐带缆向机器人传递动力与控制信号,并通过导管螺旋桨对机器人进行轨迹与姿态操纵。对带缆遥控水下机器人的轨迹控制,目前除了采用导管螺旋桨作为其主要的操纵机构外,通过调节脐带缆长也可以作为另外一种操纵控制方式。这两种控制方式有其各自的特点:采用导管螺旋桨的操纵方式具有便于精确定位的优点,调节脐带缆长的操纵方式则具备了快速深度轨迹调节的能力。通过调节脐带缆长和控制导管螺旋桨转速的联合操纵方式能够使水下机器人更快速准确达到预定轨迹和位置,这对于提高水下机器人操纵速度和精度具有重要意义^[1]。在海流环境下快速收放缆操作有可能造成水下机器人姿态失衡,研究如何通过采用适当的控制方法来协调对机器人的控制动作,以降低由于脐带缆张力与海流非定常变化因素对维持水下机器人稳定操纵的影响,具有重要的工程意义。

目前对水下机器人操纵问题的研究多未考虑来流因素或只考虑来流为定常状态^[2-4],但实际海况下不可避免会出现非定常来流的扰动,从而使水下机器人的位置和姿态发生变化。文献[5]研究了来流定常条件下导管螺旋桨的流场与推力特性,该研究中未考虑来流变化对机器人系统的水动力和控制的影响。文献[6]通过改变水下拖曳体的水平尾翼攻角实现了对水下拖曳体姿态的控制,但是需要在拖航速度或来流速度较大时才能起到较好的控制效果。

现有对水下机器人的控制手段主要有采用PID控制^[7-10]、滑模控制^[11]、模糊理论控制^[12]、神经网络控制^[13-14]等,其中滑模控制方法是一种变结构控制方法,它能够适用于水动力的非线性问题,但是会出现控制系统延迟以及抖振等情况;基于模糊理论和神经网络的方法则验证不够充分,还有待完善^[15];而PID控制是一种比较经典的控制方法,其控制方法简单,稳定性好,可靠性高,目前被广泛应用。

文献[16]利用多重滑移网格研究了导管螺旋桨的推力特性,但是滑移网格需要建立多个计算域,利用各计算域之间的相对运动实现等效运动。文献[17]利用动网格与滑移网格相结合的方式研究导管螺旋桨的推力特性问题,但是这种方式是利用相对运动原理建立多个计算域,与真实的运动情况有一定的距离。重叠网格能够处理螺旋桨等具有复杂表面外形的模型,网格生成简单且不需要重新生成网格,不会出现负体积等,非常适合水下机器人的水动力计算。

本文应用重叠网格与滑移网格相结合的方法研究水下机器人的水动力与控制问题,通过PID方法调节脐带缆长度和控制导管螺旋桨转速的联合操纵方式实现水下机器人的深度轨迹定位和运动控制,并利用PID控制方法解决收放缆和来流变化所引起的水下机器人的姿态失衡问题。在此过程中需要借助超算手段解决产生的超大计算量问题,由于文中的算例是PID算法耦合水动力计算,且PID算法中的参数需要多次调试才能得到理想结果,导致计算量巨大,因此需要利用超算平台解决。本文所用超算资源为:AMD EPYC 7452,单节点64核,主频2.35 GHz,256G内存,每个算例采用3个节点并行计算,时间步长为0.02秒,每个时间步迭代30次,算例中的物理时间1秒需要在超算平台计算约1小时。

1 水下机器人系统水动力数学模型

1.1 水下机器人的运动方程

本文的水下机器人带缆运动水动力模型可以用潜艇的六自由度运动方程来描述,在水下机器人局部坐标系下,该方程^[18-19]可以表述为

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X \quad (1)$$

$$m[\dot{v} + ur - wp + x_G(pq + \dot{r}) - y_G(p^2 + r^2) + z_G(qr - \dot{p})] = Y \quad (2)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp + x_G(pr - \dot{q}) + y_G(qr + \dot{p}) - z_G(p^2 + q^2)] = Z \quad (3)$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + I_{xy}(pr - \dot{q}) - I_{yz}(q^2 - r^2) - I_{xz}(pq + \dot{r}) + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} + ur - wp)] = K \quad (4)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr - I_{xy}(qr + \dot{p}) + I_{yz}(pq - \dot{r}) + I_{xz}(p^2 - r^2) - m[x_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{u} - vr + wq)] = M \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(pr + \dot{q}) + I_{xz}(qr - \dot{p}) + m[x_G(\dot{v} + ur - wp) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N \quad (6)$$

方程(1)~(6)的左端项为机器人的惯性力和力矩,右端项为作用在机器人上的外力和外力矩,其符号按照标准方法标注。作用在机器人上的外力 $F_0 = (X, Y, Z)^T$ 和外力矩 $M_0 = (K, M, N)^T$, 假定由流体静回复力、脐带缆张力、海流及机器人本身在水下运动而引起的水动力、控制螺旋桨的推力以及其相应的力矩^[20] 等分量构成,因此有

$$F_0 = F_W + F_T + F_H + F_{TH} \quad (7)$$

$$M_0 = M_W + M_T + M_H + M_{TH} \quad (8)$$

在方程(7)~(8)中,下标 W 代表流体静回复力、T 代表脐带缆张力、H 代表包括海流因素在内的作用在水下机器人主体上的水动力、TH 代表导管螺旋桨的推力。

在方程(7)中导管螺旋桨的推力合力 F_{TH} 可通过水下机器人上各个姿态控制用导管螺旋桨所发出的推力 F_{THi} 叠加得到, F_{TH} 为螺旋桨转速、考虑了机器人主体对螺旋桨周围流场影响后的螺旋桨进速等因素的函数:

$$F_{TH} = \sum F_{THi} \quad (9)$$

在方程(9)中下标 i 代表各导管螺旋桨的序号, $i = 1, 2, \dots, N_{TH}$, N_{TH} 为安装在机器人上的正在运转的导管螺旋桨的总数,而 F_{THi} 的值在固定于机器人主体上的局部坐标系中进行表达。相应地,由控制螺旋桨力 F_{THi} 所产生的力矩 M_{THi} 由下式给出:

$$M_{THi} = r_i F_{THi} \quad (10)$$

式中, r_i 为在机器人局部坐标系上表达的控制螺旋桨推进力动力作用点的坐标,

$$r_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N_{TH}) \quad (11)$$

因此,方程(8)中的 M_{TH} 由下式确定:

$$M_{TH} = \sum M_{THi} \quad (12)$$

在机器人局部坐标系上脐带缆张力 F_T 和力矩 M_T 可分别表达为

$$F_T = -[E][D]T \quad (13)$$

$$M_T = r_T F_T \quad (14)$$

式中, T 为脐带缆的张力。

1.2 水下机器人主体水动力载荷、导管螺旋桨的控制力及脐带缆张力

方程(7)和(8)中作用在水下机器人上的水动力载荷 F_H 、 M_H , 脐带缆张力载荷 F_T 、 M_T 以及导管螺旋桨的控制力 F_{TH} 、 M_{TH} , 均通过计算流体力学手段得到其数值解。求解时首先利用建模软件建立包含导管螺旋桨在内的水下机器人的三维几何模型,然后将模型导入计算流体力学软件 Star-ccm+, 并将脐带缆以悬链线的形式予以简化,由 Star-ccm+ 软件中的体耦合部件“悬链线”生成,模拟作用于机器人主体上的脐带缆张力,采用重叠网格与滑移网格相结合的方法在机器人、导管螺旋桨和脐带缆所在流场内求解其流体力学控制方程,由此可以得到作用在水下机器人主体上的水动力载荷,以及导管螺旋桨所产生的推力、转矩和脐带缆的张力。

在 Star-ccm+ 中,对悬链线的处理忽略了流体力对小直径脐带缆的直接作用,准稳态的弹性脐带缆方程为

$$\begin{cases} x = a\lambda + b \sinh(\lambda) + \alpha \\ y = a \cosh(\lambda) + \frac{b}{2} \sinh^2(\lambda) + \beta \end{cases} \quad (15)$$

$$\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2, \quad a = \frac{c}{m_0 g}, \quad b = \frac{ca}{kL_r}, \quad c = \frac{m_0 L_r g}{\sinh(\lambda_2) - \sinh(\lambda_1)} \quad (16)$$

式中, m_0 为单位长度的脐带缆质量, k 为脐带缆刚度, L_r 为脐带缆松弛长度, α 、 β 为脐带缆两端位置以及

脐带缆总质量相关的积分常数, 曲线参数 λ 与脐带缆上该点的切向角 φ 有关:

$$\tan \varphi = \sinh \lambda \quad (17)$$

图1中, p_1 为在拖曳母船运动坐标系下定义的脐带缆上端点, p_2 为在水下机器人运动坐标系下定义的脐带缆下端点, 即脐带缆的两端分别为 p_1 、 p_2 点, 则拖曳母船和水下机器人无相对运动时脐带缆两端点 p_1 、 p_2 处的作用力 F_1 、 F_2 分别为

$$F_{1,x} = c, \quad F_{1,y} = c \sinh(\lambda_1) \quad (18)$$

$$F_{2,x} = -c, \quad F_{2,y} = -c \sinh(\lambda_2) \quad (19)$$

1.3 模型计算方法的验证

上文建立了由主体、脐带缆和若干导管螺旋桨组成的水下机器人三维水动力仿真计算模型。受经费和实验条件等的限制, 本文暂不能

对水下机器人系统整体模型进行物理模型实验验证, 只能从两个侧面进行验证: 一是对文中所用仿真计算方法进行验证, 二是对导管螺旋桨的计算进行验证。其中, 对于仿真计算方法的可靠性验证, 作者已经在文献[21]中进行了证明, 本文不再赘述。

由于螺旋桨高速旋转时的运动剧烈程度远超水下机器人其他部位, 整个水下机器人系统模型中网格变形幅度最大、更新速度最快的部位即为导管螺旋桨周围部位, 螺旋桨的旋转是影响水下机器人系统仿真计算最重要和最关键的因素, 因此选择将导管螺旋桨作为仿真计算的重要验证内容之一, 通过与模型实验结果对比, 验证导管螺旋桨水动力计算技术的可靠性和精确性。根据 Spry 等^[22]的水池模型实验中的导管螺旋桨, 建立 Ka 4-70/19A 型导管螺旋桨数值计算模型(如图2所示), 并对计算模型的网格进行了优化(如图3所示), 运动核心区域采用较密集的网格, 特别是对螺旋桨叶梢与导管内壁交界部位进行了局部网格加密, 远离桨叶运动的区域则采用稀疏网格, 这样能够在保证计算精度的情况下有效减少计算量。

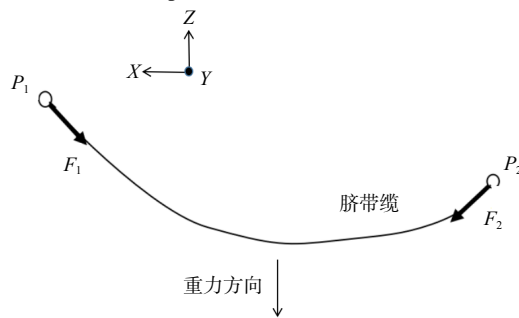


图1 脐带缆端点作用力示意图

Fig.1 Force on the two ends of umbilical cable

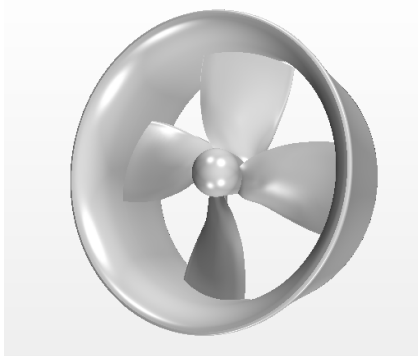


图2 导管螺旋桨模型

Fig.2 Ducted propeller model

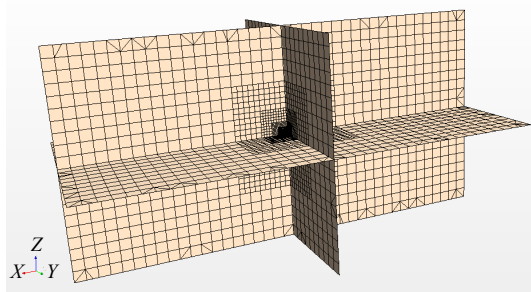


图3 计算模型整体网格剖面图

Fig.3 Grid profile of model

导管螺旋桨的主要几何参数与水池实验^[22]中模型的主要几何参数保持一致, 如表1所示。

为了尽量避免壁面等的影响, 建立的计算模型中水域为一个 $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的长方体水域, 边界条件如表2所示。

为了检验网格密度对仿真计算精度的影响, 本节中设计了粗糙、中等和精密三种网格密度进行计算, 将计算结果与模型实验数据对比以确定模型在不同网格密度设置下的计算精度。本节选取了导管螺旋桨在 1500 r/min 下的推力大小与 Spry 等的模型水池实验做对比, 结果如表3所示。

表 1 导管螺旋桨几何参数

Tab.1 Geometric parameters of ducted propeller

名称/单位	数值	名称/单位	数值
直径/m	0.0473	叶数个数	4
盘面比	0.7	导管长度/m	0.0236
螺距比	0.99	导管入口直径/m	0.061
叶倾角/(°)	8	导管出口直径/m	0.051
毂径比	0.18		

表 2 导管螺旋桨计算模型的边界条件

Tab.2 Boundary conditions of ducted propeller model

边界范围	计算域边界条件	边界范围	计算域边界条件
螺旋桨表面	壁面	左端面	壁面
导管表面	壁面	右端面	壁面
前端面	速度进口	上端面	速度进口
后端面	压力出口	下端面	壁面

表 3 不同网格密度下导管螺旋桨的推力大小对比

Tab.3 Comparison of thrust of ducted propeller under different grid densities

网格密度	总体网格数量(万)	与模型实验 ^[22] 的相对偏差(%)
粗糙	35.1	41.4
中等	52.8	13.9
精密	74.0	7.8

从表 3 可以看出, 网格密度越精细, 仿真计算结果就越精确, 当计算模型的网格密度达到约 74 万时, 与实验测得的误差已经小于 10%。综合考虑计算精度、计算时间和计算节点成本等, 达到精密级别的网格密度可适用于后续的仿真计算。

采用精密级别的网格密度, 导管螺旋桨附近最小网格尺寸为 0.001 m, 计算模型整体网格数量为 74 万, 根据模型实验设置了 500 r/min、1000 r/min 以及 1500 r/min 三种工况计算导管螺旋桨的推力, 通过利用超算平台多节点并行计算的方式使得计算能够顺利进行, 未出现负体积等情况。仿真计算所得导管螺旋桨推力与模型实验^[22]测得的推力对比如图 4 所示, 500 r/min、1000 r/min 以及 1500 r/min 三种工况下计算所得的推力与模型实验^[22]测得推力的误差分别为 5.6%、1.3% 和 7.8%, 三种情况下的计算误差均在 10% 以内, 可见设置的网格密度, 边界条件等合理可靠, 采用的 Star-ccm+计算方法能够较好地满足导管螺旋桨的计算需求, 可用于水下机器人的仿真计算。

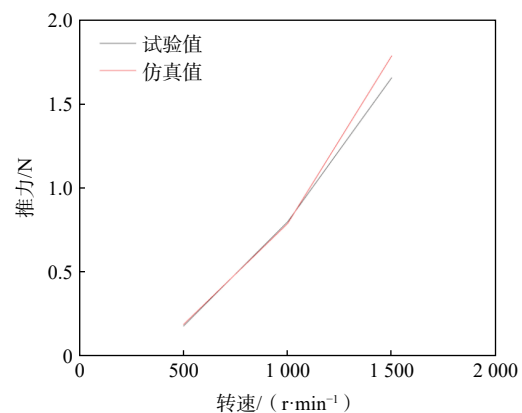


图 4 导管螺旋桨推力对比

Fig.4 Thrust comparison of ducted propeller

1.4 水下机器人系统水动力计算模型构建

本文所研究的水下机器人几何模型如图 5 所示, 机器人由流线型主体和安装在主体不同位置的四个导管螺旋桨组成, 其中左、右两个导管螺旋桨负责提供水平方向的推力, 前、后两个导管螺旋桨负责提供垂向推力, 并设置垂直尾翼以增加水下运动的航向稳定性, 水下机器人系统参数见表 4。

本文利用 Star-ccm+求解水下机器人在海流环境下的运动和姿态状态,采用 $k-\epsilon$ 模型来模拟流场的湍流特性,每一时间步水下机器人系统的水动力载荷采用重叠网格与滑移网格相结合的方式来计算求解。

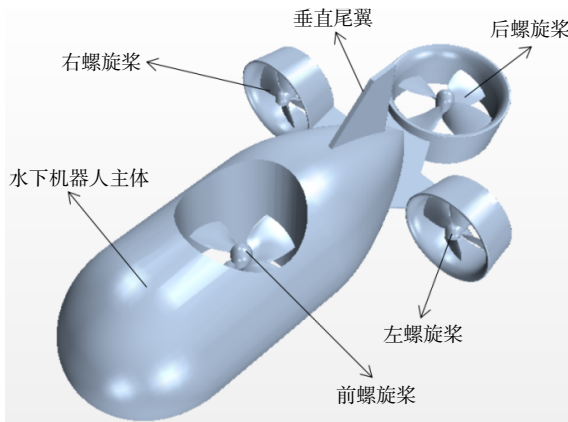


图 5 水下机器人模型
Fig.5 Underwater robot model

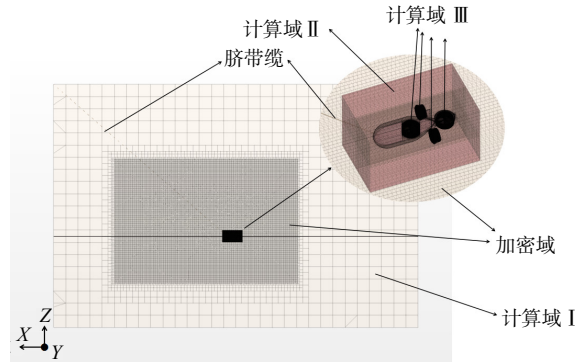


图 6 水下机器人系统计算网格模型
Fig.6 Computational grid of underwater robot system

表 4 水下机器人主要参数
Tab.4 Primary parameters of the robot model

分系统	参数/单位	数值	分系统	参数/单位	数值
水下机器人主体	长度/m	0.472	—	—	—
	宽度/m	0.287			
	高度/m	0.176			
	左右桨轴心距离/m	0.200			
	前后桨轴心距离/m	0.251			
导管螺旋桨	盘面比	0.7	导管螺旋桨	左、右导管出口直径/m	0.077
	螺距比	0.99		前、后桨直径/m	0.095
	毂径比	0.18		后导管长度/m	0.045
	左、右桨直径/m	0.071		后导管进口直径/m	0.113
	左、右导管长度/m	0.036		后导管出口直径/m	0.095
	左、右导管进口直径/m	0.086			

为了对所分析的水下机器人系统的水动力载荷进行数值计算,本文构造了相应的计算网格与计算域。水下机器人系统计算网格见图 6,共设置了计算域 I、计算域 II 和计算域 III 三个计算域;计算域 I 为背景计算域,并设置了一个加密域;计算域 II 为包裹水下机器人的长方体区域;计算域 III 为四个独立的包裹螺旋桨的圆柱形区域。计算域 I 和计算域 II 之间是重叠关系,计算域 III 与计算域 II 之间是滑移关系,各计算域尺寸和网格数量见表 5。流体域与机器人表面交界处采用边界层形式过渡,共 5 层网格,最小厚度为 5×10^{-4} m,最大厚度为 3.9×10^{-3} m。边界条件设置见表 6。

表 5 计算域参数
Tab.5 Parameters of the computational domains

名称	尺寸/m	网格尺度/m	网格数量(万)
计算域 I	12 × 4 × 8	0.4	总计 339.8
加密域	6 × 2 × 5	0.025	
计算域 II	0.65 × 0.4 × 0.38	0.006 25	总计 105.7
计算域 III	左右螺旋桨所在圆柱区域: 高 0.40, 直径 0.8 前后螺旋桨所在圆柱区域: 高 0.46, 直径 1.0	0.001	

表 6 计算域之间的边界条件

Tab.6 Boundary conditions of the computational domains

名称	边界条件	名称	边界条件
螺旋桨表面	壁面	计算域 I 后端面	压力出口
水下机器人表面	壁面	计算域 I 左端面	壁面
计算域 I 与计算域 II 的界面	重叠	计算域 I 右端面	壁面
计算域 II 与计算域 III 的界面	滑移	计算域 I 上端面	速度进口
计算域 I 前端面	速度进口	计算域 I 下端面	壁面

2 水下机器人系统 PID 控制模型

在所构建的水下机器人系统水动力计算模型基础上,采用 PID 算法对脐带缆长度和导管螺旋桨旋转进行联合操纵的方式控制水下机器人的运动。本文采用增量式 PID 控制方法^[23],将当前时刻的控制量和上一时刻的控制量做差,以差值作为新的控制量,控制公式如下:

$$\Delta U_k = U_k + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (20)$$

式中, U_k 为控制目标, ΔU_k 为控制目标的增量, $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 为计算控制量的差值, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, K_d 为微分系数。

将脐带缆简化为悬链线的形式,初始长度为 9 m,上端点为固定点,下端点连接水下机器人,随水下机器人的运动而产生张力,因此选择垂向深度与预设深度的偏差值作为脐带缆的 PID 计算控制量,控制公式为

$$L_k = L_0 + K_p [Ze(n) - Ze(n-1)] + K_i Ze(n) + K_d [Ze(n) - 2Ze(n-1) + Ze(n-2)] \quad (21)$$

式中, L_k 为脐带缆的长度, L_0 为脐带缆初始长度, $Ze(n)$ 为第 n 步的实际垂向深度与预设深度的差值, $Ze(n-1)$ 为第 $n-1$ 步实际垂向深度与预设深度的差值, $Ze(n-2)$ 为第 $n-2$ 步实际垂向深度与预设深度的差值。

由于上升和下降过程中脐带缆会对水下机器人产生一个垂向拉力,迫使水下机器人产生一个纵倾角度,因此可以根据纵倾角的大小调整后导管螺旋桨的转速和旋转方向,从而产生不同的升力。后导管螺旋桨同样采用增量式 PID 算法控制,选择机器人纵倾角与预设角度的偏差值作为后导管螺旋桨的 PID 计算控制量, PID 控制公式为

$$R_k = R_0 + K_p [Ae(n) - Ae(n-1)] + K_i Ae(n) + K_d [Ae(n) - 2Ae(n-1) + Ae(n-2)] \quad (22)$$

式中, R_k 为每次调节时螺旋桨的转速, R_0 为螺旋桨初始转速, $Ae(n)$ 为第 n 步的实际纵倾角度与预设纵倾角度的差值, $Ae(n-1)$ 为第 $n-1$ 步实际纵倾角度与预设纵倾角度的差值, $Ae(n-2)$ 为第 $n-2$ 步实际纵倾角度与预设纵倾角度的差值。

3 数值计算结果与分析

3.1 垂向升沉运动

升沉运动是水下机器人常见的操作动作。对于带缆遥控水下机器人,可以通过收放脐带缆的形式实现升沉运动。本节设置的水下机器人升沉运动轨迹为梯形,通过 PID 控制收放缆,此过程中螺旋桨静止不动,以水下机器人开始释放时的垂向位置作为 0 m 预设位置, $t=0\sim 2$ s 这段时间内先使水下机器人达到稳定状态, $t=2\sim 12$ s 时间段内使水下机器人从 0 m 的位置上升到 1 m,然后在 $t=12\sim 20$ s 时间段内保持 1 m 的高度稳定,最后在 $t=20\sim 30$ s 时间段内从 1 m 的位置下降到 0 m 的位置,整个过程中保持来流速度为 3 kn,来流方向为沿 X 轴负向。

图 7 为水下机器人整个升沉运动垂向位置与预定轨迹位置的对比,图 8 为整个过程中脐带缆长度的变化。从图 7 和图 8 中可以发现,在 PID 控制下,从 $t=2\sim 30\text{ s}$ 整个运动过程中,水下机器人在 Z 向实际轨迹位置与预定轨迹位置基本一致,在时间 $t=12\text{ s}$ 时,水下机器人最终上升到达并维持的高度为 0.985 m 左右,与预定高度 1 m 的误差为 1.5% ,可见本文利用 PID 控制升沉运动的效果较好。

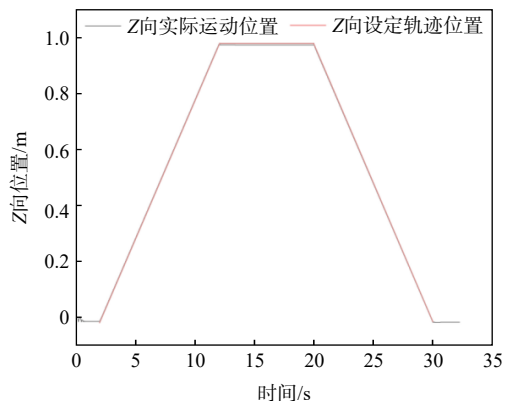


图 7 水下机器人升沉运动垂向位置

Fig.7 Z-position of underwater robot in heave motion

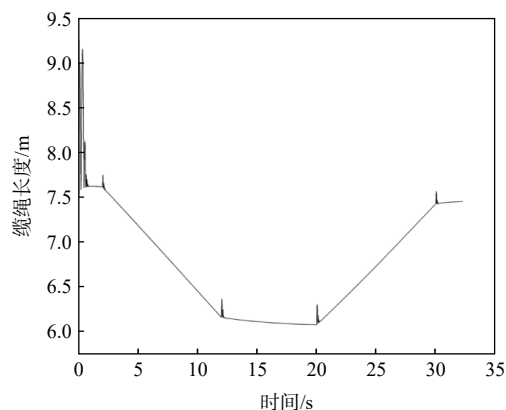


图 8 脐带缆长度变化

Fig.8 Change of cable length

水下机器人在整个升沉运动过程中的受力如图 9 所示,脐带缆张力变化如图 10 所示。 $t=0\sim 2\text{ s}$ 这段时间是机器人从释放到达到一个相对稳定状态的过程,机器人受到来流、脐带缆和重力的共同作用,在 PID 调节作用下,X 方向的受力逐渐稳定到 30 N 左右,Z 方向的受力逐渐稳定在 10 N 左右; $t=2\sim 12\text{ s}$ 时间段水下机器人处于上升阶段,脐带缆处于收缆阶段,机器人在 X 方向的受力达到 33 N 左右,同时作用在脐带缆的张力到达 31 N 左右;在 $t=12\sim 20\text{ s}$ 时间段内,机器人处于 Z 向深度保持阶段,机器人受力和脐带缆张力都比上升阶段有所减小; $t=20\sim 30\text{ s}$ 时间段为水下机器人下降到 0 m 位置的运动阶段,这个过程中机器人受力和脐带缆张力比上升阶段和深度保持阶段更小。从整个运动过程来看,本文使用的 PID 方法能够准确平稳地实现水下机器人的升沉运动。

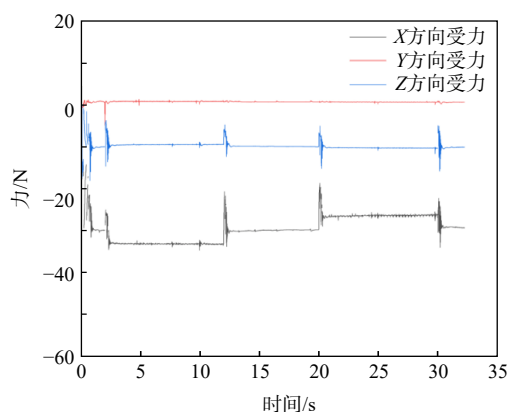


图 9 水下机器人升沉运动过程中的受力

Fig.9 Time history of forces imposed on the robot in heave motion

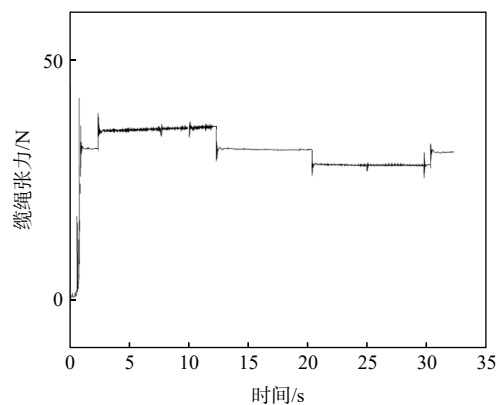


图 10 脐带缆张力变化

Fig.10 Time history of tension force of the cable

3.2 来流变化

水下机器人在工作时不可避免地会受到海流扰动的影响,来流的变化会打破水下机器人原有的受力平衡状态,迫使机器人偏离既定的航线和位置。本节通过利用 PID 算法对脐带缆和后导管螺旋桨进行联合控制的形式,研究水下机器人在来流变化时的深度保持情况。仍然以水下机器人开始释放时的

垂向位置作为预设深度 0 米, 初始来流速度为 3 kn, 待机器人状态稳定后, 将来流速度增大到 4 kn, 整个过程中通过 PID 调节脐带缆长度以及后导管螺旋桨的旋转, 将机器人的深度继续维持在 0 m 左右。

图 11 为整个过程中水下机器人的深度变化, 图 12 为脐带缆长度变化, 其中 $t=0\sim 24$ s 时间段内来流为 3 kn, 24 s 后来流为 4 kn。在 PID 调节下, 水下机器人在 3 kn 来流下逐渐达到稳定状态, 深度最终稳定在 -0.003 m 左右, 与预设深度 0 m 相差仅 3 mm; 当来流从 3 kn 变为 4 kn 时, 水下机器人深度略有上升, 最终稳定在 0.012 m 左右, 与预设深度 0 m 相差 12 mm。

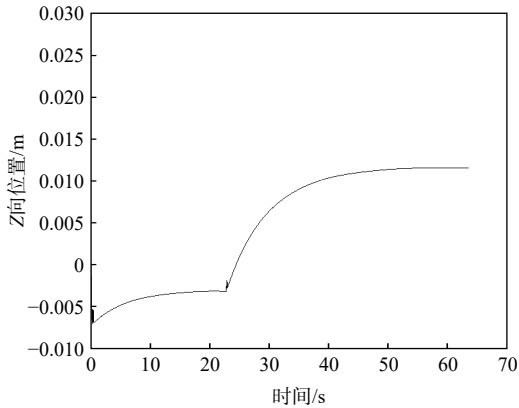


图 11 来流变化时水下机器人垂向位置

Fig.11 Time history of Z-position of robot in ocean current

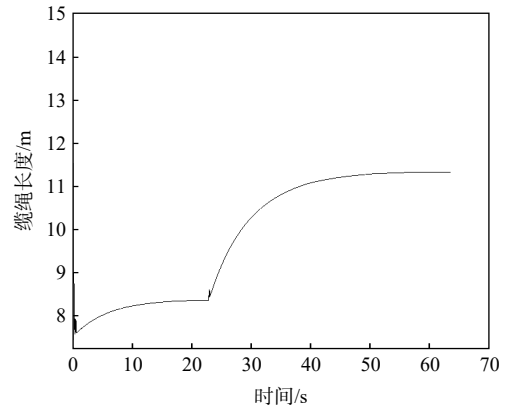


图 12 来流变化时脐带缆长度变化

Fig.12 Change of cable length in ocean current

图 13 为来流变化时水下机器人的受力变化过程, 图 14 为来流变化时脐带缆张力的变化过程。从图中可以看出, 在 $t=24$ s 时, 来流从 3 kn 变为 4 kn, 机器人的受力和脐带缆的受力在极短时间内产生波动, 这是导致图 11 中机器人垂向位置和图 12 中脐带缆长度也产生短时间波动的原因, 之后水下机器人的 Z 向受力以及脐带缆张力都随之增大, 且增大的速率逐渐减小, 最终到达稳定状态。在整个运动过程中, 机器人的受力主要集中在 X 方向, 也就是来流的方向, 垂向受力基本保持稳定, 并不会随着来流增大而产生明显变化, 而横向受力在来流增大时会产生一定程度的波动, 因此可以看出, 来流速度从 3 kn 变为 4 kn 主要会影响水下机器人沿来流方向的受力大小。

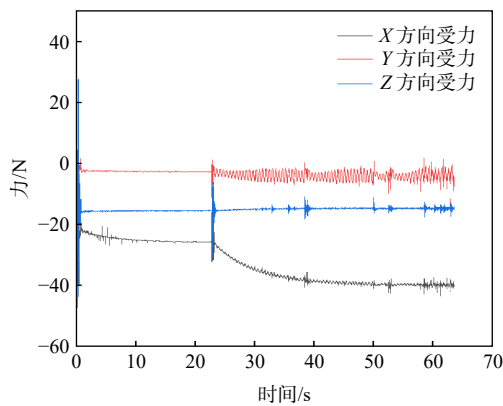


图 13 来流变化时水下机器人的受力

Fig.13 Time history of force imposed on the robot in ocean current

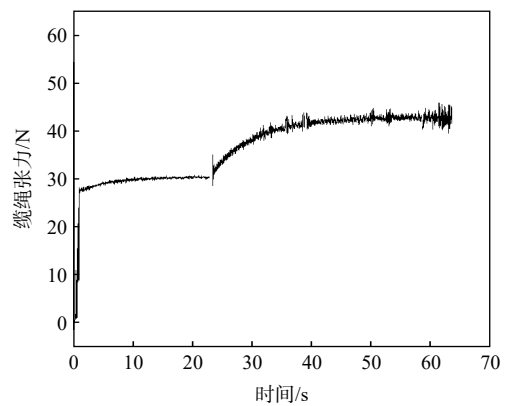


图 14 来流变化时脐带缆张力变化

Fig.14 Change of tension force of the cable in ocean current

图 15 为此过程中后导管螺旋桨的转速变化曲线, 从图中可以看出: 水下机器人在来流为 $V_s=3$ kn 时从 $t=0$ s 开始释放, 此时由于水下机器人纵倾角度为正, 触发 PID 算法调节机制, 后导管螺旋桨反向旋转, 随着纵倾角度的逐渐减小, 螺旋桨的旋转速度也逐渐降低, 并稳定在反向 35 rad/s (约

334 r/min)左右;从 $t=22$ s 开始,来流速度从 $V_s=3$ kn 突然增大到 $V_s=4$ kn,螺旋桨旋转方向开始由负转正,转速也逐渐增大,提供向上的升力,最终在 $t=55$ s 左右的时候开始达到转速为 1210 r/min 的稳定状态。

通过以上分析可知,在来流从 3 kn 突变为 4 kn 时,通过 PID 算法调节脐带缆的收放和后导管螺旋桨的旋转,可以使水下机器人保持在 $Z=0$ m 附近,最大偏移量为 0.012 m 左右,与预设深度 0 m 相差 12 mm。

3.3 姿态调整

水下机器人由于受到脐带缆张力等的影响,在运动过程中会产生不同程度的纵倾角,姿态的不平衡会对水下机器人的航行安全以及机载仪器设备的测量精度等产生不利影响。本文设计的水下机器人在来流为 3 kn 时,需保持 0 m 的垂向深度,如果只通过收放缆的形式操控会产生大约 -20.7° 的纵倾角,显然不利于水下工作的开展,因此在水下机器人的尾部设置了一个垂直方向的后导管螺旋桨,对水下机器人纵倾角的调节主要通过对这个螺旋桨进行 PID 控制的方式来实现,选择机器人纵倾角的偏差值作为导管螺旋桨的 PID 计算控制量。

图 16 为水下机器人在来流速度为 3 kn、保持深度为 0 m 状态时,启用后导管螺旋桨 PID 控制与无 PID 控制时两种状态水下机器人的纵倾角对比。从图中可以看出,在没有对后导管螺旋桨进行 PID 控制时,水下机器人的纵倾角大概稳定在 -20.7° 左右,启用 PID 控制后可以快速得到响应,纵倾角减小到 -3.7° 左右,减小约 82%,而且纵倾角更加稳定。

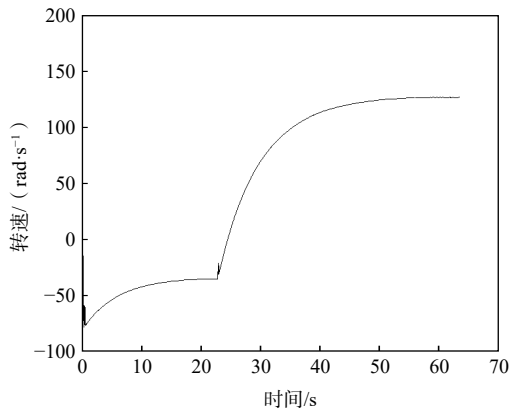


图 15 来流变化时螺旋转速变化

Fig.15 Change of propeller rotation speed in ocean current

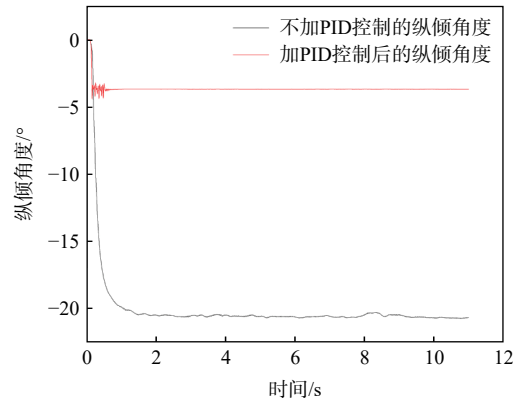


图 16 纵倾角对比

Fig.16 Comparison of the trim angles with and without PID control

对于某些特殊工况,需要水下机器人以特定的纵倾角度工作,特别是当水下机器人在不同运动状态下一直保持相同的纵倾角度尤为不易。本文运用 PID 控制方法对水下机器人的升沉运动进行姿态控制,假定水下机器人在整个升沉运动中需要保持 -15° 的纵倾角,此时的运动工况同 3.1 节。

图 17 为水下机器人在升沉运动过程中 PID 控制对纵倾角影响的对比。从图 17 的结果可以看出,在不对后导管螺旋桨进行 PID 控制时,在 $t=0\sim 2$ s 这段时间内水下机器人的纵倾角度达到 -20.8° 左右; $t=2\sim 12$ s 时间段为上升阶段,由于脐带缆张力的增大,水下机器人纵倾角度

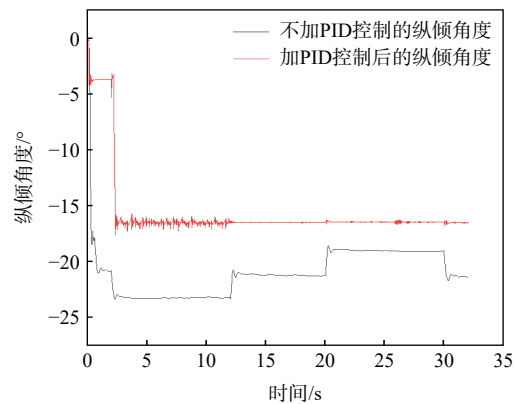


图 17 升沉运动纵倾角对比

Fig.17 Comparison of the trim angles in heave motion with and without PID control

也增大到 -23.2° 左右; $t=12\sim 20$ s 时间段为深度保持阶段,此时脐带缆张力较上升阶段有所减小,水下机器人纵倾角恢复到 -20.8° 左右; $t=20\sim 30$ s 时间段为下降阶段,脐带缆张力较前两个阶段更小,纵倾角减小到 -19° 左右。对后导管螺旋桨启用 PID 控制后,在 $t=0\sim 2$ s 这段稳定期内,纵倾角度大约为 -3.8° ,之后在 $t=2\sim 30$ s 时间段,无论是上升期、深度保持期还是下降期均保持在大约 -16.4° 左右,与不加 PID 控制相比,PID 控制后将最大纵倾角减小约 7° ,距离设定的目标纵倾角 -15° 只差 1.4° 左右。

4 结 论

本文采用重叠网格和滑移网格相结合的方法,研究了水下机器人在有来流情况下的水动力性能,并运用 PID 方法对水下机器人进行运动控制和姿态调整,取得了良好的效果。通过本文的分析可知:

(1)水下机器人在来流速度为 3 kn 情况下做升沉运动时,通过对脐带缆进行 PID 控制,能够使水下机器人的运动轨迹与设定的升沉运动轨迹基本保持一致,水下机器人到达并保持的水下最大高度为 0.985 m,与预定 1 m 的高度仅相差 1.5%;

(2)在来流速度从 3 kn 增大到 4 kn 时,来流变化主要影响水下机器人沿来流方向的受力大小,通过 PID 调节脐带缆收放使得水下机器人的深度稳定在 0.012 m 左右,对于 0 m 的预设深度来说基本可以保持原有的深度;

(3)通过对后导管螺旋桨进行 PID 控制可以调整水下机器人的姿态,使得水下机器人在来流速度为 3 kn 时的纵倾角从 -20.7° 左右快速减小到 -3.7° 左右,减小了约 82%,而且纵倾角更加稳定;也可以在升沉运动这样的复杂工况下使得水机器人始终保持 -16.4° 纵倾角,与设定的 -15° 的纵倾角仅相差 1.4° 左右。

参 考 文 献:

- [1] 吴家鸣,赖宇锋,李江伟,等.水下潜器系统导管螺旋桨水动力特性及周围流场分布预报与分析[J].船舶力学,2018,22(5):540-551.
Wu J M, Lai Y F, Li J W, et al. Hydrodynamics and flow field prediction for ducted propeller in an underwater vehicle with a yawing motion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(5): 540-551. (in Chinese)
- [2] Eldred R, Lussier J, Pollman A. Design and testing of a spherical autonomous underwater vehicle for shipwreck interior exploration[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9: 1-27.
- [3] 郁苗.带缆遥控水下机器人的模糊滑模控制研究[D].广州:华南理工大学,2010.
Yu M. Research on fuzzy sliding mode control of a remotely operated underwater vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] 马影,陈丽,张宇.仿生机器人拍翼非定常水动力特性[J].信息与控制,2020,49(57):598-604.
Ma Y, Chen L, Zhang Y. Unsteady hydrodynamic characteristics of bionic robot flapping[J]. Information and Control, 2020, 49(57): 598-604. (in Chinese)
- [5] Wu J M, Chen D J. Trajectory following of a tethered underwater robot with multiple control techniques[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2019, 141: 1-9.
- [6] 金雪峰.基于模糊控制理论对水下拖曳体进行轨迹与姿态控制研究[D].广州:华南理工大学,2006.
Jin X F. Research on trajectory and attitude control of underwater towed vehicle based on fuzzy control theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [7] 冯迎宾,于洋,杜学历.半潜式水面机器人轨迹跟踪控制方法研究[J].沈阳理工大学学报,2020,39(4):59-63.
Feng Y B, Yu Y, Du X L. Research on trajectory tracking control algorithm for semi-submersible unmanned surface vehicle[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2020, 39(4): 59-63. (in Chinese)
- [8] 朱春磊,曾庆军,徐鹏程,等.观察型水下机器人预测控制器优化设计研究[J].计算机仿真,2020,37(6):332-337.

- Zhu C L, Zeng Q J, Xu P C, et al. Research on optimization design of predictive controller for observational underwater vehicle[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(6): 332–337. (in Chinese)
- [9] Sani A Y M, 王 京. 基于 PID 算法的水下机器人路径及轨迹规划研究[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(8): 206–221.
- Sani A Y M, Wang J. Research on path and trajectory planning of underwater robot based on PID algorithm[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2020, 10(8): 206–221. (in Chinese)
- [10] 陈东军. 多机构操纵下带缆遥控水下机器人控制与水动力问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Chen D J. Research on control and hydrodynamic response of a tethered underwater robot under multi-mechanism manipulations[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 薛乃耀. 作业型水下机器人运动控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Xue N Y. Research on motion control system of remote operated vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 尹梦舒, 冯 常. 基于模糊技术的水下机器人运动控制[J]. *人工智能*, 2015, 34(17): 75–77.
- Yin M S, Feng C. Motion control of underwater vehicle based on fuzzy technology[J]. *Artificial Intelligence*, 2015, 34(17): 75–77. (in Chinese)
- [13] 贾亮瑜. 自主水下机器人回收姿态控制研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- Jia L Y. Research on attitude control of AUV recovery[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] 方 凯, 姚佳琪, 李家旺. 基于神经网络的欠驱动水下机器人三维同步跟踪和镇定控制[J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(6): 731–738.
- Fang K, Yao J Q, Li J W. Three-dimensional simultaneous tracking and stabilization of underactuated autonomous underwater vehicles based on neural network[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 731–738. (in Chinese)
- [15] 吴 杰, 王志东, 凌宏杰, 等. 深海作业型带缆水下机器人关键技术综述[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(4): 1–12.
- Wang J, Wang Z D, Ling H J, et al. Review on technologies of work-class ROV in deep-water industry[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 34(4): 1–12. (in Chinese)
- [16] 叶志坚. 水下机器人多自由度控制下水动力响应的多重滑移网格技术分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Ye Z J. Analyze on hydrodynamic response to multiple DOF control of a remotely operated underwater vehicle base on multiple sliding mesh[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] 钟 乐, 吴家鸣, 张恩伟, 等. 基于动网格与滑移网格混合技术的导管螺旋桨推力研究[J]. *广东海洋大学学报*, 2017, 37(4): 105–112.
- Zhong L, Wu J M, Zhang E W, et al. Research of the ducted propeller' thrust based on hybrid technique of moving grid and sliding grid[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2017, 37(4): 105–112. (in Chinese)
- [18] Abkowitz M A. Stability and motion control of ocean vehicles[M]. MIT Press, 1969: 32–50.
- [19] Gertler M, Hagen G L. Standard equations of motion for submarine simulation[R]. David Taylor Research Center, Washington, D. C., Technical Report DTMB 2510, 1967.
- [20] 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.
- Wu J M, Yu M, Zhu L L. A hydrodynamic model for a tethered underwater robot and dynamic analysis of the robot in turning motion[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(8): 827–836. (in Chinese)
- [21] Yang X Y, Wu J M, Li Q L, Lü H Y. Numerical simulation of depth tracking control of an underwater towed system coupled with waveship interference[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8): 874.
- [22] Spry S C, Empey D M, Webster W C. Design and characterization of a small-scale azimuthing thruster for a mobile offshore base module[J]. *Marine Structures*, 2001, 14(2001): 215–229.
- [23] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- Tao Y H, Yin Y X, Ge L S. New PID control and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)