

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2016.0588

基于垂向推进方式的 AUV 低速近底稳定航行

郑 荣¹, 马艳彤^{1,2}, 张 斌¹, 韩晓军¹, 安家玉¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对低速状态下自治水下机器人 (AUV) 翼舵力不足的问题, 提出了一种基于垂向推进方式的 AUV 低速近底稳定航行控制方案. 基于航速因素, 对比分析了翼舵和垂向推进器的推力特性, 设计船艏槽道垂向推进器布置方案. 在此基础上通过改进 PID (比例-积分-微分) 控制策略, 优化参数完成垂向运动控制. 最后利用某型 AUV 进行湖上试验, 对比翼舵推进方式, 得出垂向推进器驱动方式具有更好的低速状态下近底定高航行操控性, 实现了控制航行体高度均方差在 0.1 m、纵倾均方差在 0.5° 以下的稳定航行.

关键词: 自治水下机器人; 垂向槽道推进器; 近底定高航行; PID 控制算法

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-05-0588-05

Stable Control for AUV's Near-bottom and Low-speed Sailing Based on Vertical Thruster

ZHENG Rong¹, MA Yantong^{1,2}, ZHANG Bin¹, HAN Xiaojun¹, AN Jiayu¹

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: For the problem of insufficient flap rudder force of autonomous underwater vehicle (AUV) when navigating at low speed, a low-speed near-bottom stable control navigation scheme based on vertical thruster is presented. Based on the navigating speed, the thrust characteristics of the flap rudder and vector propeller are analyzed comparatively. Then the layout scheme of vertical thruster units in fore and aft grooves is designed. And AUV vertical motion control can be achieved by tuning PID (proportional-integral-derivative) parameters and optimizing control strategy. Finally, a large number of lake trials show that the vertical thruster can achieve better near-bottom fixed-depth sailing controllability at low speed compared with flap rudder thruster, and the vehicle can realize stable navigation with mean square errors of height within 0.1 m and pitch within 0.5°.

Keywords: autonomous underwater vehicle; vertical groove thruster; near-bottom fixed-depth sailing; PID (proportional-integral-derivative) control algorithm

1 引言 (Introduction)

自治水下机器人 (AUV) 作为人类探索海洋的重要工具, 在近海岸观测、深海资源勘探开发、海洋水文探测等领域发挥着重要作用. 随着 AUV 的广泛应用, 对其航行性能提出了更高的控制要求. 对于 AUV 定深控制的研究, 国内外主要采用改进控制算法、多种算法相结合的方式, 已取得了突破性的研究成果^[1-2]. 但在对航行体的近底定高航行的稳定性控制方面, 尚未建立起完善的控制体系^[3]. 相较于航行体的定深运动, 近底定高运动要求航行体具有更快速的海底地形自适应性和更复杂的垂向调控机制^[4]. 因此, 航行体的近底定高稳定航行控制成为研究欠驱动水下机器人的重点突破性

难题.

当今, 国内外多是通过翼舵调节航行体航行纵倾角而实现航行深度的控制^[5], 但这仅适用于航行体做中高速 (大于 2 kn) 航行的情况. 其原因主要在于翼舵在 AUV 低速航行时舵效很低, 难以精确、稳定地控制航行深度^[6]. 基于此, 美国的“sentry”号 AUV 和中国科学院沈阳自动化研究所的“潜龙二号” AUV 采用旋转式螺旋桨的推进方式, 即通过控制 4 个螺旋桨的旋转角度来达到航行控制^[7-8]. 但此种方式对航行体的外形有特殊的要求, 且系统配置复杂无法适用于传统的细长回转体外形的 AUV. 文 [4,9-10] 在低速状态下采用垂向推进器驱动航行体垂向运动, 实现了较稳定的定深控制, 但还未实现其近底定高稳定控制, 且控制精度还有待

于进一步提高.

为解决以上问题, 本文针对细长回转体外形 AUV 的通用驱动配置——艏部安装一个主推进器、一对水平升降舵和一对垂直方向舵, 提出增设艏艉槽道推进单元模块, 来提供航行体垂向驱动力, 以弥补低速下艏翼舵力不足的缺陷. 通过 PID 控制算法调节垂向误差值, 优化推进器转速, 实现航行体低速模式下垂直面近底定高航行控制. 该方案在不破坏 AUV 现有系统的基础上, 增设艏艉槽道推进单元, 适当增加其长度而不改变整体外形, 因而成本低, 适用性强; 另外, 这种改进方式可形成模块化配置, 方便 AUV 的功能扩展, 实用性强.

2 自治水下机器人推进器推力特性及推进器布置 (The characteristics of the propeller and the arrangement of thrusters about AUVs)

自治水下机器人的翼舵和螺旋桨推进器作为主要推进系统, 提供了水下机器人运动的驱动力. 推力特性的分析是推进器布置和下水机器人航行性能控制与分析的基础. 现对翼舵和垂向推进器进行推力特性分析, 对比得出航速对其产生推力大小的影响, 从而得出低速状态下垂向推进器驱动方式优于翼舵驱动方式这一结论.

2.1 自治水下机器人推进器推力特性

2.1.1 翼舵力特性分析

根据水动力学的理论, 随着 AUV 前进速度的降低, 作用在舵面上的水流压力越来越小, 导致舵力不足, 无法充分发挥作用^[5,11-13], 因而无法在低速状态下驱动航行体运动. 本文采用分离型模型结构方式, 即 MMG 模型. 以单独舵在无限的均匀流场中的敞水流体动力特性为基础, 考虑航行体和螺旋桨对舵力的干涉影响. 在此基础上建立数学模型, 得出艏舵所受正压力计算公式^[14].

$$F_N = -\frac{1}{2}\rho A_R f_a U_R^2 \sin \alpha_R \quad (1)$$

式中: ρ 为水的密度; A_R 为舵叶面积; U_R 为舵处来流有效流速, 即舵叶对水速度; α_R 为舵处来流有效冲角; f_a 为舵的升力系数在 $\alpha_R = 0$ 时的斜率.

由式 (1) 可得出翼舵所受正压力正比于航行体速度. 当航行体速度较低时, 舵力很小, 无法实现航行体垂向运动控制.

2.1.2 垂向推进器螺旋桨推力特性

本文采用的垂向推进器螺旋桨为导管螺旋桨. 在低速状态下, 导管螺旋桨可将效率提高到 20%,

因此特别适合水下机器人^[15].

据文 [15] 得出螺旋桨推力计算公式为

$$T_0 = \rho n^2 D^4 K_T \quad (2)$$

式中: n 为螺旋桨转速, D 为螺旋桨直径, K_T 为推力系数.

当螺旋桨安装到载体上时, 推力受到诸多复杂因素的影响, 尤其是水的流速会影响螺旋桨的入流量从而影响推力. 流速对推力的影响可近似地表示为^[15]

$$T = T_0(1 - K_{IT}V_C) \quad (3)$$

式中: V_C 为相对于推力器的入流速度, K_{IT} 为入流推力系数.

由式 (3) 可知导管螺旋桨推力与航行体入流速度成反比例关系, 即速度越小, 推力越大, 当速度为 0 时, 推力达到最大值 T_0 . 相比于翼舵驱动方式, 垂向推进方式可弥补低速状态下翼舵力不足的现状. 因此, 从理论上证实了低速模式下采用垂向推进方式驱动航行体垂向运动这一方案的可行性.

2.2 艏艉推进器布置

在分析了垂向推进器推力特性后, 设计如图 1 所示的艏艉推进器布置方案, 即在载体艏艉段增设槽道, 将推进器置于其中, 构成模块化推进系统. 采用这种布置方式, 根据推力器的方向, 推进系统既可以产生推力, 也可以产生推力矩, 能够同时驱动航行体垂向定高和纵倾运动. 易得推力和推力矩计算公式如下:

$$T = T_1 + T_2 \quad (4)$$

$$M = T_1 S_1 - T_2 S_2 \quad (5)$$

分别将式 (3) 代入到式 (4) 和 (5) 中, 得航行体受到的艏艉推进器推力和推力矩分别为

$$T = (T_{01} + T_{02})(1 - K_{IT}V_C) \quad (6)$$

$$M = T_{01}(1 - K_{IT}V_C) \cdot S_1 - T_{02}(1 - K_{IT}V_C) \cdot S_2 \quad (7)$$

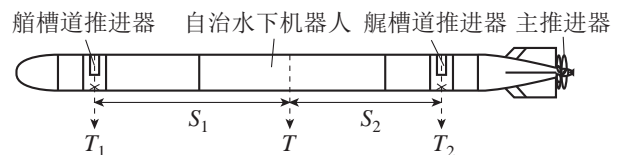


图 1 艏、艉推进器布置示意图
Fig.1 Distribution of bow and stern thrusters

3 AUV 垂向运动控制 (AUV vertical motion control)

航行体垂直面的控制主要体现在航行高度和航行纵倾角的控制上. 航行体的高度变化通过垂向推

进器推力控制,纵倾角变化通过推力矩控制.控制框图如图2所示.

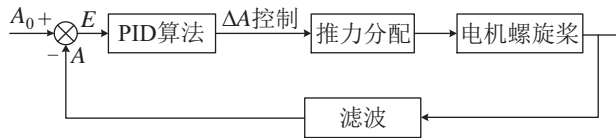


图2 垂向运动控制框图

Fig.2 Block diagram of vertical motion control

3.1 高度和纵倾PID控制

垂向的高度和纵倾控制通常是在AUV航行过程中实现的^[16].由于航行体高度和纵倾角相互制约,存在耦合,现将高度PID控制和纵倾角PID控制进行整合处理,得出如下控制算法:

$$\Delta A = K_p \cdot e_1 + K_i \cdot \sum_{m=0}^m e_{1m} + K_d \cdot \frac{e_{2k} - e_{2k-1}}{T} \quad (8)$$

式中, e_1 为高度偏差值, e_2 为纵倾角偏差值.

与传统的PID算法不同的是,本算法并未单独调节高度和纵倾偏差,而是采用如式(8)所示的方式,即PID的比例、积分误差项为高度偏差值,微分误差项为纵倾角偏差值.这种控制算法可同时做到高度和纵倾角的偏差控制,减少航行器垂向运动的频繁调整,有效避免水下机器人易出现的“海豚”现象,同时可大大缩减响应控制时间.

3.2 推力计算与分配

在航行体的控制中一项重要的步骤就是进行推力计算与分配.此过程主要是将传感器数据进行整合,根据高度偏差控制量和纵倾角偏差控制量建立与目标控制力值 T_y 和力矩值 M_z 的非线性关系,将得出的结果分配到具体的执行机构上,控制其定高航行时的高度和纵倾角^[16].由 T_y 和 M_z 计算船艏垂直电机所需力值的公式如式(9)和(10)所示:

$$T_{BV} = M_z \cdot L_{sb} + L_s \cdot T_y \cdot L_{sb} \quad (9)$$

$$T_{SV} = -M_z \cdot L_{sb} + L_b T_y \cdot L_{sb} \quad (10)$$

式中: T_{BV} 为船垂向所需力值, T_{SV} 为艏垂向所需力值, L_{sb} 为船、艏推进器距重心距离导数系数项, L_s 为艏推进器距重心距离系数项, L_b 为船推进器距重心距离系数项.

3.3 螺旋桨转速计算

得出垂向所需推力后,再通过控制推进器转速,最终达到航行体高度和纵倾角的精确控制.

采用参数辨识方法得出推力与电机转速之间的函数关系,得出在低速模式下目标推力与电机转速的关系式为

$$n = \frac{0.475 + \sqrt{1.647T - 0.973}}{0.7} \quad (11)$$

需要指出的是:低速巡航模式下,航行体前向推动力仍由主推进器提供.

4 试验结果分析 (Trial analysis)

本试验AUV长度9.5m,直径534mm,空气中净重1.5t,最大下潜深度为200m,水平舵角最大为25°,船艏垂向推进器最大转速为1800r/min.2016年2月在杭州千岛湖进行了AUV翼舵驱动和垂向推进器驱动的对比试验.

本文针对航行体近底定高5m稳定航行阶段,对垂向推进方式下垂向运动数据进行分析,水平面如航向偏差和横滚角不作分析.考虑到航行体在低速状态下翼舵无法驱动其近底定高航行,航行体会因运动不可控而发生船部扎底等危险状况.因此,对垂向推进方式与翼舵驱动方式进行对比分析时,将翼舵驱动下的航行参数设为定深10m.

4.1 垂向运动控制分析

本文采用PID算法,通过高度偏差和纵倾偏差控制航行体所需垂向力值和力矩值,进而控制垂向推进器转速.

4.1.1 控制器性能分析

实现精确的误差调节,关键在于PID控制器的参数整定.首先通过仿真系统确定初始参数,然后试验过程中根据航行状态数据及各参数对控制性能的影响反复调节,以期获得最佳的控制性能^[17].通过试验得出,此PID控制策略下的偏差响应曲线如图3所示,其中相对偏差 δ ($\delta = \text{偏差} / \text{航行体长度}$) 超调量为0.337,阶跃响应时间为26s,表明此PID控制器良好的控制性能.

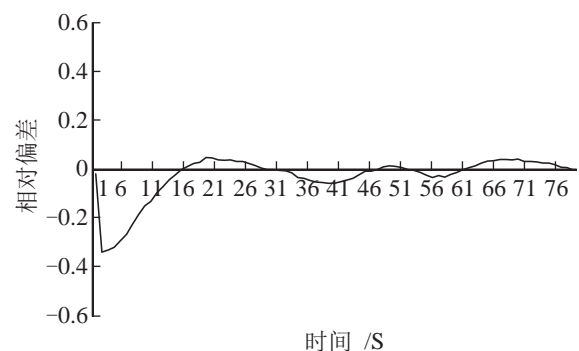


图3 误差响应曲线

Fig.3 Error response curve

4.1.2 推力和推力矩控制性能分析

由船艏垂向推进器提供垂向驱动力,控制航行体垂向运动.其中,船艏推进器推力矢量和控制高度变化,船艏推进器推力计算出的推力矩控制纵倾变化.垂向推进器对纵倾角和高度的控制曲线分别如图4和图5所示.

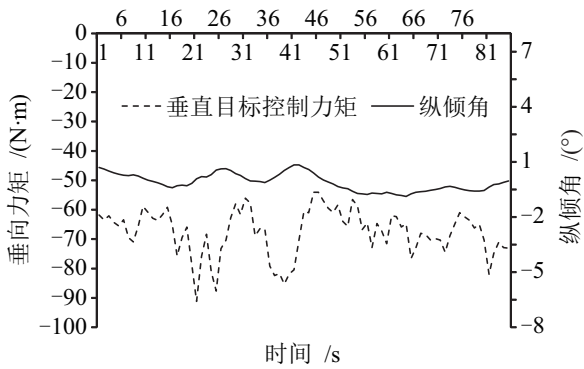


图 4 垂向推进器控制的纵倾角变化曲线
Fig.4 Pitch curve with vertical thruster control

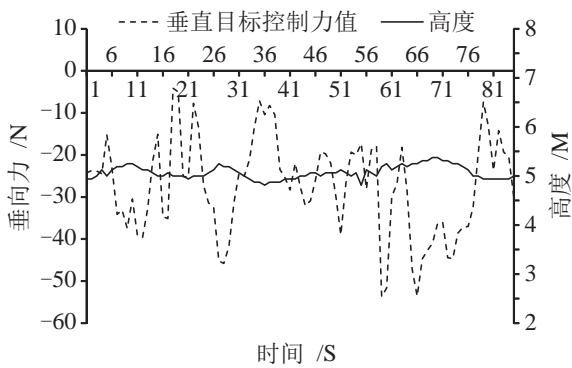


图 5 垂向推进器控制的高度变化曲线
Fig.5 Height curve with vertical thruster control

从曲线中可以得出, 航行体在运动过程中, 随着纵倾角和高度的不断变化, 在垂向推进方式下不断调整垂向控制力值和力矩值, 以实时调节纵倾和高度误差, 实现垂向的精确控制. 该实验表明垂向推进方式具有良好的准确性与快速性调节性能.

4.2 不同速度下控制性能对比试验

为了得出翼舵驱动和垂向推进方式在不同速度下的垂向运动控制性能, 分别做了航行体在速度为 1.0 kn、1.2 kn、1.4 kn 时航行的对比试验. 其中, 翼舵驱动时定深 10 m 直线航行, 垂向推进时定高 5 m 航行. 不同速度下两种推进方式的纵倾角和深度/高度控制性能对比情况如表 1 所示.

表 1 两种推进方式的控制精度对比

Tab.1 Control accuracies of the two thrusters

速度 /kn	翼舵驱动		垂向推进器	
	纵倾均方差 /($^{\circ}$)	深度均方差 /m	纵倾均方差 /($^{\circ}$)	高度均方差 /m
1.0	6.019	2.554	0.467	0.131
1.2	1.187	0.686	0.523	0.165
1.4	0.475	0.450	1.696	0.241

从试验结果可以看出, 航行体在 1 kn 低速航行时, 垂向推进器驱动方式下的纵倾角和高度控制精

度明显优于翼舵驱动方式, 其误差均方差值分别达到了 0.467° 和 0.131 m , 实现了航行体在低速状态下的垂向稳定控制. 同时, 验证了前面对翼舵在低速状态下控制力差而垂向推进器控制良好的理论分析.

4.3 两种推进方式的垂向运动控制对比试验

为进一步验证翼舵驱动方式和垂向推进方式在低速状态下对航行体近底定高航行的控制性能, 采用控制变量法做出对比试验, 即垂向运动分别由艏舵垂向推进器和翼舵来控制. 低速航行下航行体前向速度为 1.0 kn, 且处于稳定直航阶段. 纵倾和高度对比试验分别如图 6 和图 7 所示.

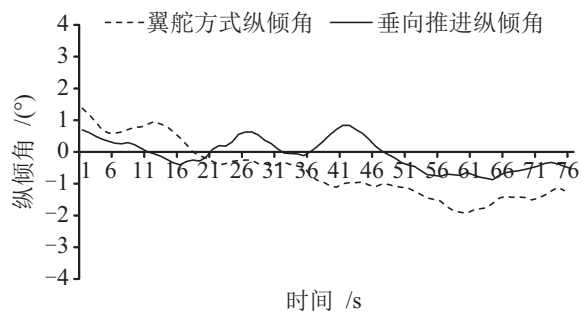


图 6 两种推进方式下的纵倾角对比
Fig.6 Pitch comparison under the two propulsion control

从图 6 中曲线可以看出, 翼舵驱动纵倾角呈下降趋势, 表明翼舵未能起到调节作用; 垂向推进驱动航行体纵倾角在 0° 上下波动, 且波动量小, 误差均值为 0.08° .

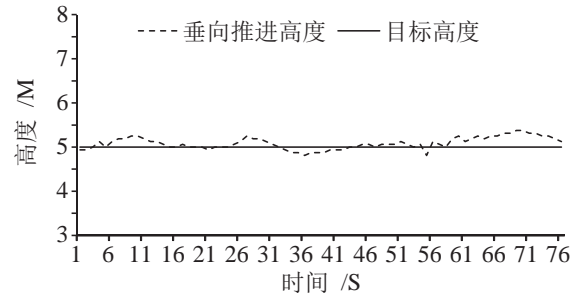
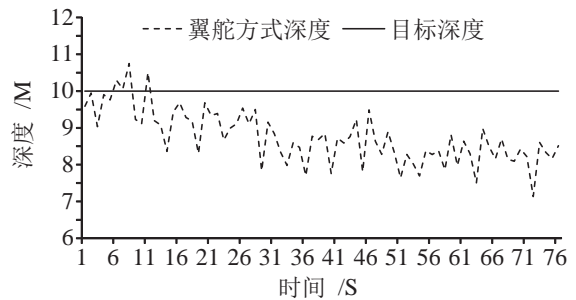


图 7 两种推进方式下的深/高度对比
Fig.7 Height/depth comparison under the two propulsion control

从图7可以看出,翼舵驱动航行体定深10 m航行时,深度变化幅度较大,波动明显,表明翼舵驱动方式对航行体垂向运动控制性能较差;垂向推进器驱动航行体定高5 m航行时,航行体高度变化平稳,波动小,均值达到了5.05 m,明显优于翼舵对航行体深度的驱动控制.经以上分析,得出垂向推进器驱动方式具有更好的垂向运动控制稳定性.

5 结论 (Conclusion)

本文针对水下机器人航行体垂直面航行稳定性差的问题,提出增设船艏垂向推进器来驱动航行体垂向运动的方案.通过垂向推进器驱动方式和翼舵驱动方式湖上对比试验,得出垂向推进器驱动方式能够稳定控制航行体垂向运动,其高度和纵倾角变化平稳,波动小,明显优于翼舵驱动控制.该方案解决了航行体在低速航行模式下翼舵无法精确控制垂直面运动的问题,实现了低速模式下稳定的垂直面近底定高控制,提高了水下机器人的航行控制性能.另外,该方案适用于当今大多数细长回转体外形的AUV,对其整体系统改动量小,适用性广,可作为模块化设备,具有很大的推广意义.

参考文献 (References)

- [1] Nag A, Patel S S, Akbar S A. Fuzzy logic based on depth control of an autonomous underwater vehicle[C]//2013 IEEE International Multi Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 117-123.
- [2] Watson S A, Green P N. Depth control for micro-autonomous underwater vehicles (μ AUVs): Simulation and experimentation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(1): 1-10.
- [3] Eddison J F P, Fryer D K. Some aspects of submarine behaviour when on the surface in shallow water[C]//Warship'91 International Symposium on Naval Submarines. 1991.
- [4] 万磊, 张英浩, 孙玉山, 等. 基于重构容错的智能水下机器人定深运动控制[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 723-730. Wang L, Zhang Y H, Sun Y S, et al. AUV's depth control based on reconstructive fault-tolerant control[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(4): 723-730.
- [5] 晏亮, 赵琳, 程建华. 潜艇操纵运动的舵效仿真研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 12-15. Yan L, Zhao L, Cheng J H. Rudder effects simulation of submarine maneuvering motion[J]. Computer Simulation, 2009, 26(7): 12-15.
- [6] 龚浩, 吴先用, 黄宇, 等. 一种矢量推进方式下的AUV数学建模[J]. 中国仪器仪表, 2015(8): 41-44. Gong H, Wu X Y, Huang Y, et al. Mathematical modeling of a kind of AUV with vector thruster[J]. China Instrumentation, 2015(8): 41-44.
- [7] Wynn R B, Huvenne V A I, Le Bas T P, et al. Autonomous underwater vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience[J]. Marine Geology, 2014, 352 (S1): 451-468.
- [8] Anon. Unmanned robot submarine navigates, maps sea floor[J]. Materials Performance, 2008, 47(10): 12-13.
- [9] 卫民. 基于矢量推进器的AUV运动控制系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2012. Wei M. Research on the control system of the vectored thruster AUV[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [10] 张利军, 齐雪, 赵杰梅, 等. 垂直面欠驱动自治水下机器人定深问题的自适应输出反馈控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1371-1376. Zhang L J, Qi X, Zhao J M, et al. Depth-keeping control for autonomous underwater vehicle in vertical plane using adaptive output feedback controller[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(10): 1371-1376.
- [11] 吕欣倍, 张铁栋, 王聪, 等. 水下自主航行器舵翼水动力性能分析[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2015, 18(3): 56-59. Lü X P, Zhang T D, Wang C, et al. Hydrodynamic performance prediction on the rudder wing of autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2015, 18(3): 56-59.
- [12] 吴宝山, 潘子英, 陈纪军, 等. 潜艇组合翼舵的水动力非线性特性研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(1): 54-58. Wu B S, Pan Z Y, Chen J J, et al. Investigation on nonlinear characteristics of normal force on stern-plane of submarine by CFD simulation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(1): 54-58.
- [13] 郭春雨, 杨晨俊, 马宁. 襟翼舵的敞水及桨后水动力性能研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 108-111. Guo C Y, Yang C J, Ma N. Research of the hydrodynamic performance of flap rudder on open water and behind propeller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(11): 108-111.
- [14] 孙鲁闽. 襟翼舵的开发利用[J]. 船舶工程, 2015, 37(9): 37-40,44. Sun L M. Design and application of flap-type rudder[J]. Ship Engineering, 2015, 37(9): 37-40,44.
- [15] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000: 77-82, 270-286. Jiang X S, Feng X S, Wang D T. Unmanned underwater vehicles[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000: 77-82, 270-286.
- [16] 刘健, 于闯, 刘爱民. 无缆自治水下机器人控制方法研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 7-10. Liu J, Yu C, Liu A M. Research on untethered autonomous underwater vehicle control method[J]. Robot, 2004, 26(1): 7-10.
- [17] 曾俊宝, 李硕, 李一平, 等. 便携式自主水下机器人控制系统研究与应用[J]. 机器人, 2016, 38(1): 91-97. Zeng B J, Li S, Li Y P, et al. Research and application of the control system for a portable autonomous underwater vehicle[J]. Robot, 2016, 38(1): 91-97.

作者简介:

- 郑荣 (1963-), 男, 博士, 研究员. 研究领域: 自主水下机器人总体技术.
- 马艳彤 (1990-), 女, 硕士生. 研究领域: 水下机器人控制技术.
- 张斌 (1982-), 男, 硕士, 副研究员. 研究领域: AUV结构设计.