

万米级水下机器人浮力实时测量方法

刘鑫宇^{1,2}, 李一平¹, 封锡盛¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了一种适用于万米级水下机器人的实时浮力测量方法, 主要解决大于一万米水深环境下密度变化、新材料力学参数不确定等因素造成浮力计算困难的问题。该方法基于推进器和加速度计进行浮力测量。为了减少相关动力学参数不确定性对测量结果的影响, 水下机器人需要在海底执行特殊的运动动作。文中讨论了该方法的特点和适用情况, 并使用“海斗”号自主遥控水下机器人(“海斗”ARV)在近 10900 m 深的海底中进行了实验验证。实验结果表明, 该方法测量得到的结果与参考值的平均误差为 0.3 N, 满足预期要求。

关键词: 无人水下航行器; 深潜器; 浮力测量; 推进器; 加速度计

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2018)-02-0216-06

Real-time Measurement Method of Buoyancy of a Full-Ocean-Depth Underwater Robot

LIU Xinyu^{1,2}, LI Yiping¹, FENG Xisheng¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A real-time buoyancy measurement method is presented for a full-ocean-depth underwater robot to solve the difficulties in buoyancy calculation due to the change of density and the uncertainty of mechanical parameters at more than 10,000 meters depth. This method measures the buoyancy based on the propeller thrust and acceleration measurement. To minimize the measurement errors caused by the uncertainty of the dynamic parameters, the underwater robot need to perform a special motion. In this paper, the characteristics and application of the method are discussed, and an experiment is carried out at nearly 10,900 meters depth using the Hadal autonomous & remotely operated vehicle (Hadal ARV). The experimental results show that the average error of the measured result is 0.3 N, which satisfies the expected requirement.

Keywords: unmanned underwater vehicle; deep submergence vehicle; buoyancy measurement; propeller; accelerometer

1 引言 (Introduction)

常规水下机器人以浮力体(相对于升力体和其他类型的水下机器人而言)模型作为设计基础。而对于浮力体水下机器人来说, 中性浮力配置效果的好坏很大程度上决定了其在水下的作业能力和续航时间。因此, 浮力测量尤其是实时的浮力测量对实现水下机器人的高效机动作业起着关键的作用。

超过 10000 m 的深度, 海水压力大于 100 MPa, 与机器人在浅海作业时的情况不同, 高压下海水密度会发生大幅变化, 使得刚体的浮力比水面上增加了 5% 还多, 加上万米级水下机器人的工程技术条件尚不成熟, 传感器的类型和性能都受到了诸多限制, 因此在该深度下进行精确的浮力测量变得更加困难, 也产生了一些新的问题。可以归纳为如下几

点:

(1) 传感器受限。市面上的大多数海洋传感器并不能承受如此高的压力, 可以全海深使用的传感器往往体积大、重量沉而且性能较差。因此, 万米级水下机器人的浮力测量工作需要通过有限的几种传感器来测量。

(2) 浮力估算困难。非金属材料大量使用^[1], 设备模块的体积变化未知^[2], 海水密度变化^[3-4]等都会造成水下机器人浮力状态判断的失误, 超出浮力测量范围, 拖慢海试进度, 大幅延长配平时间^[5]。尤其是一些充油密封式的耐压舱, 在浅海使用条件下, 油的压缩可以忽略不计, 但在大于 100 MPa 的压力下油的体积会被显著压缩, 造成浮力变化, 加上该类器件的内部形状往往较为复杂, 体积难以测量, 使得充油耐压舱的充油量会有不确定的问题,

导致其在高压下的体积难以估算。

(3) 动力学参数变化. 潜水器模型试验获得的水动力参数与全附体真实潜水器的参数总存在差异, 附加质量参数在不同雷诺数下不稳定^[6], 加上用于实现快速下潜的特殊外形在深海水下机器人设计中大量使用, 脱离了常见的潜艇型外形, 因此深海水下机器人动力学参数的稳定性难以预测。

国内外对于万米级水下机器人浮力测量方法的研究见刊的较少, 大部分万米级水下机器人公开讨论了浮力调节方法但很少提及浮力的精确测量方法和结果. 美国伍兹霍尔海洋研究所的 Nereus HROV 为了弥补浮力计算不准的问题使用了同时抛浮力球和配重的方式来实时调节浮力. 由导演卡梅隆驾驶的“深海挑战者”号载人潜水器以及 Trieste 号载人潜水器使用手动抛钢珠的方法来粗调浮力. 国内方面, 针对 6000 m 深海 AUV 的浮力测量已经有相关研究, 在海试中取得了良好的效果^[7], 但该型 AUV 使用潜艇外形, 动力学参数可靠性比非潜艇外形的水下机器人要高. 而且, 该方法没有考虑参数变化带来的问题, 在万米级水下机器人上是否适用还需进一步验证. “海斗”号自主遥控水下机器人(“海斗”ARV)是中国科学院沈阳自动化研究所研制的第一代万米级水下机器人, 已经分别在 2016 年和 2017 年多次成功下潜至马里亚纳海沟大于 10 000 m 深的底部^[8], “海斗”ARV 由于体积限制没有安装浮力调节机构, 而无法调节浮力的水下机器人必须通过动力来抵消剩余浮力的作用^[9-10], 为了在水下作业时节省能源和提高作业效率, 浮力实时测量显得尤为重要。

本文针对全海深应用环境提出了一种万米级水下机器人浮力实时测量方法, 该方法使用推进器、深度计和航姿参考系统(AHRS)来测量浮力并在“海斗”ARV 上进行了实验验证。

2 基于推进器和加速度计的浮力测量方法 (Buoyancy measurement method based on propeller and accelerometer)

现阶段的深海水下机器人都携带有垂直方向的推进器以及加速度计, 如果已知实时的推进器推力和加速度, 则在理论上可以估计出机器人的质量和剩余浮力等参数. 但是在实际工程问题中却存在某些关键参数不确定或随工况变化的问题^[9]. 该方法通过引入推进器的推力来抵消方程中的不稳定附加质量力项。

2.1 计算公式推导

令所有竖直方向的力和速度以向下的方向为正方向. 当水下机器人仅在竖直方向上运动时有如下的垂向运动方程:

$$\tau_z = (M + M_A)\dot{v} + D(v)v - B_{\text{remain}} \quad (1)$$

其中, τ_z 为机器人受到的合外力, M 为机器人的实际质量, M_A 为机器人的附加质量, $D(v)$ 为黏滞阻力, v, \dot{v} 分别是垂直方向的速度和加速度。

如果令 $v = 0$, 则可以忽略黏性阻力 $D(v)$ 对测量结果的影响. M 可以通过在空气中称重得到, 但 M_A 在不同的雷诺数下数值会变化^[9], 导致测量结果与真实值存在较大出入, 实验中也能发现这一问题. 当外力中仅包含电机推力 F_{prop} 时有 $\tau_z = F_{\text{prop}}$, 则式 (1) 可以化简为

$$B_{\text{remain}} = (M + M_A)\dot{v} - F_{\text{prop}} \quad (2)$$

为了排除掉 M_A 随雷诺数变化对结果的影响, 认为在实验中存在 2 组不同时间下得到的数据 $v_1, \dot{v}_1, M_{A1}, F_{\text{prop}1}$ 和 $v_2, \dot{v}_2, M_{A2}, F_{\text{prop}2}$, 得到如下 2 组方程:

$$\begin{cases} B_{\text{remain}} = (M + M_{A1})\dot{v}_1 - F_{\text{prop}1} \\ B_{\text{remain}} = (M + M_{A2})\dot{v}_2 - F_{\text{prop}2} \end{cases} \quad (3)$$

令机器人执行一个动作, 使得在该动作中存在如下关系:

$$\begin{cases} v_1 = v_2 = 0 \\ F_{\text{prop}1} = -F_{\text{prop}2} \end{cases} \quad (4)$$

此时机器人垂直方向的流场相反且水平方向流场相同, 可以得到这 2 个时间点上机器人的雷诺数相同, 则有 $M_{A1} = M_{A2}$. 式 (3) 可以化简为

$$\begin{cases} B_{\text{remain}} = (M + M_{A1})\dot{v}_1 - F_{\text{prop}1} \\ B_{\text{remain}} = (M + M_{A1})\dot{v}_2 + F_{\text{prop}1} \end{cases} \quad (5)$$

消去 $M + M_{A1}$ 可得:

$$B_{\text{remain}} = F_{\text{prop}1} \frac{\dot{v}_1 + \dot{v}_2}{\dot{v}_1 - \dot{v}_2} \quad (6)$$

2.2 推进器推力建模

如果要获得良好的测量效果, 必须建立正确的推进器推力模型. 但推进器的系统模型建立需要进行大量的实验, 然而, 许多在水下机器人上使用的推进器, 尤其是一些低成本的推进器由于电机参数的缺乏或内部控制方式不透明的关系, 其建模更加困难. 但是, 推进器的稳态特性测量往往比较容

易,其推力测量也可以获得较为精确的结果.本文以推进器0进速下的稳态推力数据来代替系统模型实现推力辨识,并根据一些容易得到的动态特性参数来设计浮力测量动作,以减小动态特性对测量结果的影响.

国内外对推进器推力的研究成果较为丰富.其推力相对进速比的公式为

$$\begin{cases} F_{\text{prop}} = (1-t)\rho n^2 D^4 K_T \\ K_T = k_0 + k_1 J + k_2 J^2 \end{cases} \quad (7)$$

其中 t 为伴流系数, D 为螺旋桨的直径, n 为螺旋桨的转速, ρ 为水的密度, J 为螺旋桨的进速比. k_0, k_1, k_2 需要根据螺旋桨敞水特征曲线进行拟合来确定,而该实验需要的设备复杂,大多数水下机器人难以承担此类试验的费用.本方法需要根据实际情况对其进行化简.在应用该方法时,结合推进器的布置方式,根据式(4)中垂向速度为0的条件可以得到 $J=0$, 即 $K_T = k_0$. 则式(7)可以化简为

$$F_{\text{prop}} = (1-t)\rho n^2 D^4 k_0 \quad (8)$$

将伴流系数 t 、螺旋桨的直径项 D^4 和 k_0 统一作为辨识系数 K_{prop} 可以得到:

$$F_{\text{prop}} = K_{\text{prop}} \rho n^2 \quad (9)$$

通过静水实验,可以得到 F_{prop} 关于 n 的数据,即可辨识得到 K_{prop} . 这里需要注意的是,由于本文提到的推进器需要在全海深环境下工作,而深海压力变化对螺旋桨推力输出的影响主要体现在密度上,水下11000m左右的深度下,海水密度会比水面附近增大5%左右.因此,需要将 ρ 作为变量代入公式中而不能直接放在 K_{prop} 中进行辨识.实际实验中,推进器会在正转和反转2个象限工作,可能会需要2个不同的 K_{prop} 值,即:

$$F_{\text{prop}} = \begin{cases} K_{\text{prop-p}} \rho n^2, & n \geq 0 \\ K_{\text{prop-n}} \rho n^2, & n < 0 \end{cases} \quad (10)$$

该方法有如下几点使用条件需要注意:

(1) 机器人除流体力以外的合外力仅能由推进器提供,且2个采样点处的推进器推力大小相同、方向相反.

(2) 采样点处的垂向速度要求为0.

(3) 由于伴流系数 t 的存在,静水推力测试需要将推进器安装在机器人上以后再进行测试.

3 实验 (Experiment)

“海斗”ARV(图1)2017年在马里亚纳海沟挑战者深渊大于10000m的深处进行了多次下潜应用,在完成应用任务的同时也对文中的方法进行了实验验证.



图1 “海斗”ARV

Fig.1 Hadal autonomous & remotely operated vehicle (ARV)

在2017年TS01-03航次的ARV01潜次中,“海斗”ARV通过对自身浮力的精确测量得到了其在马里亚纳海沟挑战者深渊10900m深度附近的准确浮力,并在此基础上对之后的下潜进行配重.

在ARV06的潜次中,“海斗”ARV进行了多次基于推进器和加速度计的浮力测量,并与真实的配平数据进行了对比.

3.1 实验条件与剩余浮力参考值的确定

剩余浮力的测量在“海斗”ARV2017年马里亚纳海沟应用试验中ARV06的潜次内完成.如前所述,在ARV01潜次中,“海斗”号获得了该潜次剩余浮力精确数据.根据该数据,对ARV06潜次进行了重新配重,考虑到此次作业任务主要为坐底观测,将其在10900m附近深度的剩余浮力根据ARV01潜次获得的结果进行配置,记为 \hat{B}_{remain} ,并将该值作为浮力测量实验的参考值.

3.2 推进器参数辨识

如前所述,由于推进器的控制与反馈均为转速 n ,所以需要通过实验为式(9)辨识系数.“海斗”ARV在中国科学院沈阳自动化研究所的淡水水池中进行了该辨识实验.实验中为了保证伴流系数 t 的准确性,机器人携带完整附体并在水池的中心深度完成测量.取 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 得到单个推进器的转速与推力曲线,如图2所示.

图2中蓝色点为实验结果,红色线为辨识得到的推力曲线.可以得到双推进器共同作用时在垂直

面的推力公式:

$$F_{\text{prop}} = \begin{cases} 1.8152 \times 10^{-4} \rho n^2, & n \geq 0 \\ -1.3052 \times 10^{-4} \rho n^2, & n < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其与实验值的平均相对误差为 0.0705. 可见, 该方法对推进器推力的辨识具有较高的精度.

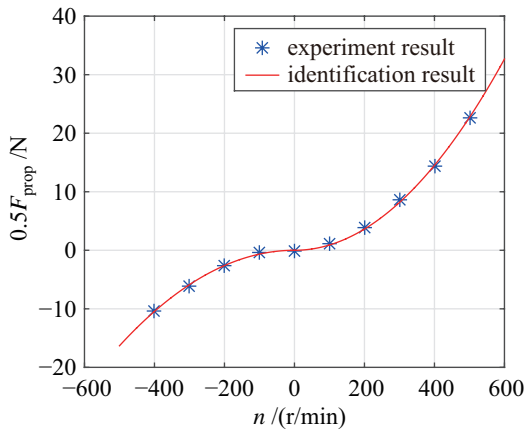


图 2 静水推进器速度与力参数辨识曲线

Fig.2 Identification of the speed and force of a single propeller in still water

鉴于推进器推力测量误差对于浮力测量结果的重要性, 这里有必要对该误差分析结果进行进一步的讨论. 本文使用的推进器转速闭环特性测量较为困难, 但其在水中固定转速下的推力值重复性较好, 稳态下的推力抖动在 10% 以内, 平均值的重复误差小于 5%. 深海压力的变化主要改变海水密度以及增加推进器电机的负荷. 由于 120 MPa 下力学特性的测试难度大, 因此没有进行带压的详细测试, 但对比推进器相同外部负载下的电流后发现, 其在高压下的电流增量可以忽略 (小于 0.1 A). 因此可以认为该推进器在深海中工作时电机由于压力造成的负荷增量可以忽略, 推力输出依然符合式 (11) 的结果, 在合适的测量动作下, 粗略估计推力输出的精度可以达到 10% 以内.

3.3 基于推进器和加速度计的浮力测量实验

为了满足该方法的相关注意事项, 规定“海斗”ARV 将主推电机旋转至竖直方向, 如图 1 所示, 并使其仅在竖直方向上运动. 根据式 (11) 可以得到推进器 0 进速的非线性推力矫正, 使其输出推力可以跟踪给定的推力参考值.

在选取采样时间点的步骤中, 一个重要的原则就是尽量在主推电机推力输出稳定的时间点进行采样, 这样才能尽可能使用推进器的稳态测量参数并且减少推进器动态特性测量不准对结果造成的

影响. 因此, 本文选用阶跃信号作为推力的参考信号, 计算出推力稳定的时间, 并在该区间内进行采样.

在计算推进器的延迟特性时, 可以选用电流数据进行辅助计算. 对于理想的电机模型, 其力矩的输出值与电流为线性关系. 因此在给定阶跃参考信号时, 扭矩输出到达稳定的时间与电流到达稳定的时间应当一致, 即可通过电流来确定推进器推力阶跃响应到达稳态的时间. 本文中使用的电流传感器测量延迟小于 0.5 s, 小于系统的采样周期, 由于只需要测量到达稳态时间, 所以对测量精度没有太高的要求.

已知对于静水中的推进器, 有 $F_{\text{prop}} = k_p Q_{\text{prop}}$, 其中 Q_{prop} 为推进器的转矩, k_p 为推力与转矩的比例系数, 在静水中是与螺旋桨半径、螺距、效率相关的一个常数. 对于电机驱动的推进器, 在恒定的输入电压下, 有理想电机模型 $Q_{\text{prop}} = k_m I_{\text{prop}}$, I_{prop} 为电机的电流, k_m 是与电机效率相关的一个常数. 可以得到:

$$F_{\text{prop}} = k_p k_m I_{\text{prop}} \quad (12)$$

即 F_{prop} 与 I_{prop} 线性相关. 基于此, 可以通过电流来判断主推电机实际输出的推力与参考推力的延迟关系, 如图 3 所示.

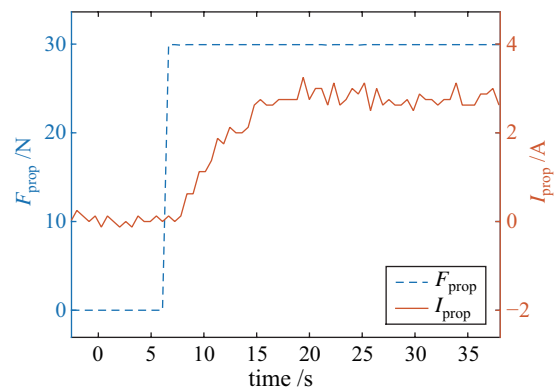


图 3 推力参考值与电流关系

Fig.3 Referenced force and current

从图 3 可以发现, 当给推力参考值一个阶跃信号时, 电流在约 10 s 后可以达到稳态状态, 根据式 (12) 可知, 实际推力输出跟踪推力参考值的时间约为 10 s.

因此, 在选取测量动作和采样点时, 应取推力参考阶跃点后约 10 s 的时间点进行采样, 同时, 为了保证在该点处的垂向速度为 0, 需要让机器人依靠惯性在采样点附近维持基本静止的状态.

基于上述考虑, 设计了如下较大深度改变的升降动作, 期间电机保持一恒定推力, 并迅速切换.

机器人在此过程中会因为惯性和附加质量的关系有一个缓慢的减速过程, 可以留出足够的时间在机器人达到0垂向速度时使电机的推力实现稳定, 即达到或超过上述的10 s 稳态时间.

令主推电机在垂直方向上的推力参考值如图4所示.

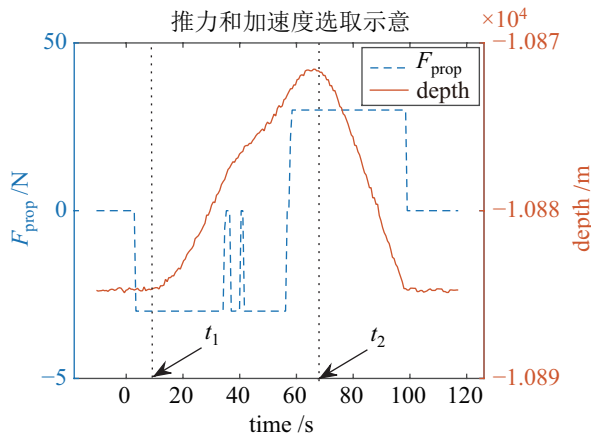


图4 采样点选取

Fig.4 Sampling point selection

令推力在 $v = 0$ 的2个时间点上方向相反且绝对值相同. 在图4中的2个 $v = 0$ 的点上对加速度计进行采样可以得到:

$$\begin{cases} F_{prop1} = -32.34 \text{ N} \\ \dot{v}_1 = -0.0245 \text{ m/s}^2 \\ \dot{v}_2 = 0.0330 \text{ m/s}^2 \end{cases}$$

代入式(6)即可得到 B_{remain} , 与剩余浮力参考值比较得到误差:

$$\tilde{B}_{remain} = B_{remain} - \hat{B}_{remain} = -0.38 \text{ N}$$

为了大致确定误差的范围, 重复进行该实验, 再次执行相似动作, 得到深度与加速度的曲线, 如图5所示.

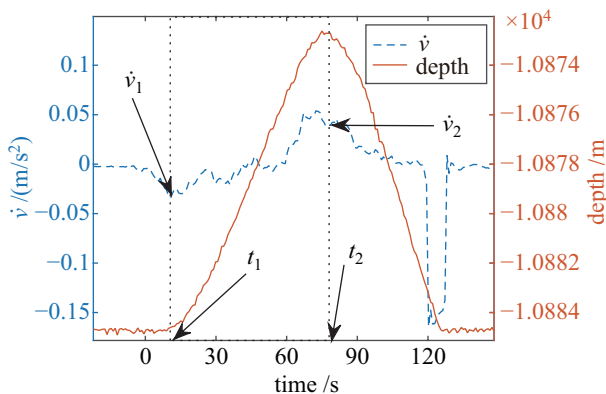


图5 加速度数据采样

Fig.5 Acceleration data sampling

图中 t_1, t_2 为采样时间点, \dot{v}_1, \dot{v}_2 为在该采样点上得到的加速度值. 比较本次测量结果 B_{remain} 与剩余浮力参考值得到误差:

$$\tilde{B}_{remain} = B_{remain} - \hat{B}_{remain} = -0.22 \text{ N}$$

由此可知, 该方法在本次下潜中测到的结果与参考值的平均误差为 -0.3 N , 能够较好地完成全海深水下机器人的浮力测量任务.

4 结论 (Conclusion)

提出了基于推进器和加速度计的剩余浮力测量方法, 该方法适用于万米级水下机器人在作业过程中测量剩余浮力, 仅通过航姿参考系统、深度计以及推进器即可进行实时的浮力测量, 并在马里亚纳海沟挑战者深渊的海试中得到了验证.

该方法可以解决万米级水下机器人的剩余浮力难以测量的难题, 为未来的浮力调节装置和弹性模量计算提供了有力的保障. 由于实验条件的限制, 对本文方法的误差范围分析较为困难, 受实验条件的限制, 目前仅能粗略地认为该浮力测量结果受推进器推力误差的影响应该在10%以内, 综合加速度测量误差等进行综合误差分析还存在一定难度, 未来将着重对本方法的误差范围进行探讨.

5 致谢 (Acknowledgements)

感谢“海斗”ARV项目组全体成员对本文工作的支持.

参考文献 (References)

- [1] Asakawa K, Hyakudome T, Yoshida M, et al. Ceramic pressure-tight housings for ocean-bottom seismometers applicable to 11-km water depth[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 37(4): 756-763.
- [2] Bowen A D, Yoerger D R, Taylor C, et al. The Nereus hybrid underwater robotic vehicle for global ocean science operations to 11,000m depth[C]//OCEANS 2008. Piscataway, USA: IEEE, 2008.
- [3] 武建国, 徐会希, 刘健, 等. 深海 AUV 下潜过程浮力变化研究[J]. 机器人, 2014, 36(4): 455-460.
Wu J G, Xu H X, Liu J, et al. Research on the buoyancy change of deep-sea autonomous underwater vehicle in diving process[J]. Robot, 2014, 36(4): 455-460.
- [4] Jamieson A J, Fujii T, Mayor D J, et al. Hadal trenches: The ecology of the deepest places on Earth[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(3): 190-197.
- [5] 武建国, 石凯, 刘健, 等. 6000 m AUV “潜龙一号”浮力调节系统开发及试验研究[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(5): 1-7.
Wu J G, Shi K, Liu J, et al. Development and experimental research on the variable buoyancy system for the 6000 m rated class “Qianlong I” AUV[J]. Ocean Technology, 2014, 33(5): 1-7.

- [6] Roddy R F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments[R]. Bethesda, USA: David Taylor Research Center, 1990.
- [7] 李硕, 燕奎臣, 李一平, 等. 6000 米 AUV 深海试验研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 1-6.
Li S, Yan K C, Li Y P, et al. Deep-sea test of 6000m AUV[J]. Ocean Engineering, 2007, 25(4): 1-6.
- [8] 中国科学院海斗深渊前沿科技问题研究与攻关战略性先导科技专项研究团队. 开启深渊之门——海斗深渊前沿科技问题研究与攻关先导科技专项进展 [J]. 中国科学院院刊, 2016(9): 1105-1111.
Team of Strategic Priority Program of on Frontier Study on Hadal Science and Technology. Open a door to the Hadal trenches – Progress on frontier study on Hadal science and technology[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016(9): 1105-1111.
- [9] 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 J B, 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.
- [10] 郑荣, 马艳彤, 张斌, 等. 基于垂向推进方式的 AUV 低速近底稳定航行 [J]. 机器人, 2016, 38(5): 588-592.
Zhen R, Ma Y T, Zhang B, et al. Stable control for AUV's near-bottom and low-speed sailing based on vertical thruster[J]. Robot, 2016, 38(5): 588-592.

作者简介:

刘鑫宇 (1989 -), 男, 博士生. 研究领域: 水下机器人控制, 水下机器人建模.

李一平 (1963 -), 女, 研究员. 研究领域: 水下机器人控制系统, 新型水下机器人系统.

封锡盛 (1941 -), 男, 研究员, 中国工程院院士. 研究领域: 水下机器人.