

基于改进领航者法的多 AUV 队形控制方法研究

李 良^{1, 2, 3, 4}, 李一平^{1, 2, 3}, 张岳星^{1, 2, 3, 4}, 曾俊宝^{1, 2, 3}, 徐高朋^{1, 2, 3}

(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. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;

3. 辽宁省水下机器人重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 针对多自主水下机器人(多 AUV)编队问题, 提出了一种基于改进跟随领航者法的编队控制方法, 通过仿真实验和湖上试验进行了验证。将对跟随者的航向和速度控制简化成单一的速度控制, 并采用多级精准速度调控方法进行编队控制。然后, 通过仿真实验对该方法进行初步验证, 并确定关键控制参数。最后, 建立一套队形评价指标, 通过外场试验验证该方法有效性。试验结果表明: 该编队控制方法在控制的快速性、准确性和稳定性等方面均表现很好。

关键词 自主水下机器人(AUV); 编队控制; 水声通信; 编队试验

中图分类号 TP242 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)06-0469-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.06.006

Research on Multi-AUV Formation Control Method Based on Improved Leader-follower Method

LI Liang^{1, 2, 3, 4}, LI Liping^{1, 2, 3}, ZHANG Yuexing^{1, 2, 3, 4}, ZENG Junbao^{1, 2, 3}, XU Gaopeng^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China; 3. Key Laboratory of Marine Robotics, Liaoning Province, Shenyang 110169, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To solve the formation problem of multiple autonomous underwater vehicles (AUVs), a formation control method based on the improved leader-follower method is proposed in this paper. The method is verified by simulation experiment and lake experiment. The leader-follower formation control method is improved by simplifying the control of heading and speed into a single speed control for the follower. A multi-stage precise speed control method is used for formation control. Then, the method is verified by simulation experiment, and the key control parameters are determined. Finally, a set of formation evaluation index is established, and the proposed method is verified by field tests. The result proves that the proposed method performs well in terms of response speed, accuracy and stability.

Key words autonomous underwater vehicles (AUV); formation control; acoustic communication; formation field test

0 引言

自主水下机器人(AUV)是当前人类探索海洋的有效工具之一,可用于绘制海底地图、研究水生动植物生活模式、观测海洋现象、安装海底管道和国防应用等^[1]。随着水下任务的日益复杂,需要通过多 AUV 协作的方式来完成单个 AUV 无法完成的水下任务。在一些任务中,多 AUV 还需要按照固定的队形编队运动^[2]。

近年来许多学者对多 AUV 编队控制进行了研究,比较成熟的编队控制方法有以下几种:基于虚拟结构法^[3]、基于行为法^[4]、基于跟随领航者法^[5-7]、基于人工势场法^[8-9]、基于路径跟随法^[10-12]和基于信息一致性法^[13-14]等。文献[15]对多 AUV 编队方法进行了综述,其中跟随领航者法最易于理解,工程应用最为广泛。文献[16]在跟随领航者法的基础上,基于跟随者的状态反馈制定领航者的运动策略,解决了跟随者出现异常时队形可能保持的问题。文献[6]使用文献[16]中提出的方法,在国内较早的基于水声通信对编队控制方法展开外场试验验证,同时分析了实际应用中水声通信存在的问题和难点,并对此提出了宝贵的解决意见。随后也有研究人员提出了多种编队控制方法,但大多处于理论分析和仿真实验验证阶段,没有在实际中进行应用。

本文在水声通信的基础上,对传统的跟随领航者法进行改进,提出了一种基于改进跟随领航者法的编队控制方法。通过仿真实验验证该方法的可行性并确定关键控制参数,然后在湖上对该方法进行试验验证,对编队控制结果进行定量描述和详细分析,证明该编队控制方法的实用性和有效性。

1 编队控制方法

传统的跟随领航者法是指多 AUV 在三维水下环境编队运动时,领航者按照给定的航行路线和速度运动,在此期间通过水声通信周期性广播自身位置和速度信息,跟随者根据接收到的领航者信息自主调整航行路线和速度,与领航者保持期望的队形。

本文研究 3 台 AUV 的编队控制,将其划分为 1 台领航者和 2 台跟随者。在跟随领航者法的基础上进行改进,跟随者通过跟踪虚拟目标点实现编队,将对跟随者的航向和速度控制简化成单一的速度控制,并采用多级调控方法对跟随者的速度进行精准调控。建立一套队形评价标准,对编队控制的快速性、准确性和稳定性进行定量评价。

1.1 改进的跟随领航者法

对传统的跟随领航者法改进,改进方法中 AUV 之间通信数据量变小,更适应通信受限情况下的水声环境。同时在通信效果不稳定时,AUV 仍能按照预设轨迹运动,抗扰动能力强,改进方法分为以下 2 步。

第 1 步,简化控制变量。给定 AUV 的运动深度和航向,AUV 在不同深度定深运动,提高水声通信成功率。AUV 沿预设航线运动,将对跟随者的航向和速度控制简化为只对速度控制。

第 2 步,精确调控速度。跟随者基于与领航者之间的距离误差反馈,调整速度以形成和保持队形。根据距离误差的大小,设置多级调控模式,提高队形形成的快速性和队形保持的稳定性。

某时刻领航者和跟随者的位置关系如图 1 所示,其中 $O_A(x_a, y_a)$ 代表领航者的真实位置和发送给跟随者的位置, $O_B(x_B, y_B)$ 和 $O_C(x_C, y_C)$ 代表 2 个跟随者的位置, O_1 和 O_2 为跟随者的虚拟目标点, $\Delta O_A O_1 O_2$ 为期望的编队队形。对其中一台跟随者 B 的速度控制方法进行数学说明。将整个平面划

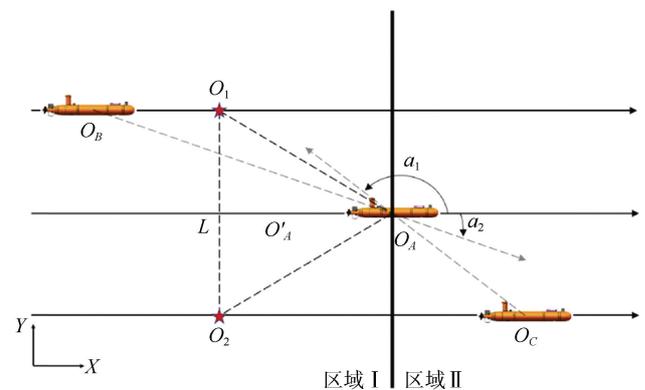


图 1 领航者和跟随者位置关系

Fig.1 Position relation between leader and followers

分成区域 I 和 II 2 部分, 分别表示跟随者在领航者的后方和前方 2 种情况。

$$\alpha_1 = \begin{cases} \gamma_a - \cos^{-1} \frac{(y_b - y_a)}{\|O_A O_B\|}, \text{若 } (x_b - x_a) \geq 0 \\ \gamma_a + \cos^{-1} \frac{(y_b - y_a)}{\|O_A O_B\|} - 2\pi, \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α_1 为射线 $\overline{O_b O_a}$ 与 γ_a 之间的夹角, 根据 α_1 的大小, 确定跟随者所处的区域。

$$\lambda = \begin{cases} 1, \text{若 } 0 < \cos \alpha_1 \leq 1 \\ 2, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ 代表跟随者所处区域, $\lambda = 1$ 表示处于区域 I, $\lambda = 2$ 表示处于区域 II。令

$$e = L - \|O_A O_B\| \quad (3)$$

式中: L 为跟随者与领航者之间的期望距离; e 为跟随者与领航者之间的距离误差。

根据公式 (2) - (3), 提出 4 种跟随者 B 相对与虚拟目标点 O_1 的位置状态: 正常 (N), 激进 (A), 落后 (L) 和脱离 (B)。根据位置状态, 制定跟随者速度控制策略, 如表 1 所示。

表 1 跟随者速度控制策略
Tab.1 Speed control strategy of the followers

序号	状态判别条件	状态	控制策略
1	$\lambda=1 \& e \leq R$	N	$v_b = k_1 e + v_a$
2	$\lambda=1 \& e \geq R$	L	$v_b = k_2 e + v_a$
3	$\lambda=1 \& e \leq -R$	A	$v_b = k_2 e + v_a$
4	$\lambda=2$	B	$v_b = v_{\min}$

表中 $R \geq 0$, 表示允许的距离误差; v_b 和 v_a 为跟随者和领航者的速度; k_1 和 k_2 为比例系数且 $k_2 > k_1 > 0$; v_{\min} 和 v_{\max} 表示设定的 AUV 最小和最大航行速度。跟随者在正常状态下, 缓慢调整速度, 维持队形。在激进或者落后状态下, 快速调整速度, 形成队形。在脱离状态下, 需要以最小速度航行等待领航者, 由脱离状态变成激进状态后快速形成队形。

1.2 队形评价指标

为定量评价编队控制效果, 从队形形成的快速性、准确性和队形保持的稳定性 3 个方面定义队形评价指标。

定义 1: 队形误差。

$$E = \sum_{i=1}^3 e_i = \sum_{i=1}^3 |D_i - L_i|, i=1,2,3 \quad (4)$$

式中: e_i 为其中 2 台 AUV 的距离误差; D_i 为 2 台 AUV 之间的欧氏距离; L_i 为 2 台 AUV 的期望距离; E 为队形误差, 其大小可以代表编队控制的精度。

定义 2: 队形形成时间。

$$\begin{cases} \text{若 } \forall t < t', \exists i, \text{使得 } e_i > R \\ \text{当 } t=t', \forall i, \text{使得 } e_i \leq R \end{cases} \quad (5)$$

式中: t' 为首次形成队形的时间, 其大小可以描述编队控制的快速性。

定义 3: 队形保持时间。

设 AUV 误差采样周期为 T_{error} , 误差采样点集合为 $E = \{E_1, \dots, E_n\}$, 若 $\exists E_j, j=1, \dots, n, \forall e_i$, 都有 $e_i \leq R, i=1,2,3$, 则称在 E_j 采样点时刻保持了队形。

$$T_{\text{total}} = T_{\text{error}} N_{\text{hold}} \quad (6)$$

式中: N_{hold} 为 E_j 的总数; T_{total} 为队形保持时间, 其大小可以反映编队控制的稳定性。

2 仿真实验

对编队控制方法进行仿真实验, 同时确定控制方法中参数 k_1 和 k_2 取值。在 MATLAB 上进行仿真实验, 3 台 AUV 分别从坐标点 (0,15)、(0,0) 和 (0,-15) (领航者位于中间) 沿 X 轴方向运动约 500 m, 领航者的期望速度 $v_a = 1.2 \text{ m/s}$, 通信周期 $T = 5 \text{ s}$, AUV 之间期望距离 $L_1 = L_2 = L_3 = 30 \text{ m}$, 整体为正三角形队形。通信成功率 $C = 80\%$, 其中 C 的定义为

$$C = \frac{N_r}{N_s} \times 100\% \quad (7)$$

式中: N_r 为跟随者接收到领航者信息的总包数; N_s 代表领航者发送信息的总包数; C 越大, 代表通信效果越好。

利用遗传算法对参数 k_1 和 k_2 进行优化, 过程如下。

Step1: 编码。给定 k_1 和 k_2 的取值范围均为 (0, 1], 采用二进制编码方式, k_1 和 k_2 分别对应 10 条

染色体的前 5 位和后 5 位。

Step2: 初始化种群。随机产生 4 个 10 位二进制个体。

Step3: 解码。对种群个体解码, 得到 4 组 k_1 和 k_2 的值。

Step4: 评估种群中个体适应度。取队形误差的平均值 \bar{E} 作为目标函数, 误差采样周期 $T_{error} = 1\text{ s}$, 将其转化成适应度函数为

$$f(k_1, k_2) = \frac{90}{E} = \frac{90}{\sum_{i=1}^3 |D_i - L_i|} \quad (8)$$

计算每个个体适应度值。

Step5: 选择。采用最佳保留选择算子, 即将适应度最高的个体完整的复制到下一代群体中, 其余个体按照轮盘赌选择方法执行选择操作。

Step6: 交叉。采用随机配对方法, 对每组个体进行单点交叉, 交叉概率 $P_c = 0.5$ 。

Step7: 变异。采用均匀变异方法, 变异概率 $P_m = 0.005$ 。

Step8: 进化终止条件。迭代次数 $N = 50$ 时停止, 否则执行 Step3。

优化后的结果如图 2 所示, 随着迭代次数的增加, 最优适应度越来越大。将最后一步迭代得到的最优个体解码得到参数 $k_1 = 0.04$, $k_2 = 0.18$ 。当取上述参数时, 3 台 AUV 的运动轨迹如图 3 所示, 编队效果很好。

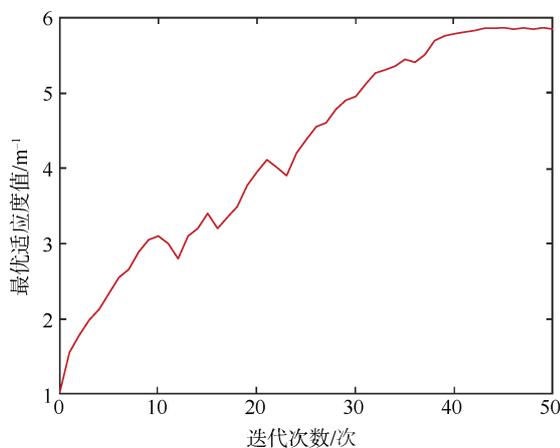


图 2 最优适应度值的迭代曲线
Fig.2 Iteration curves of the optimal fitness value

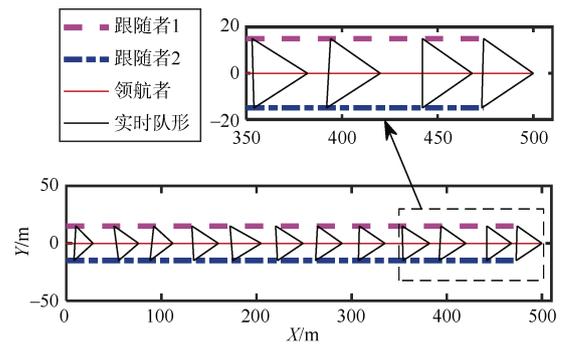


图 3 仿真运动轨迹
Fig.3 Trajectory of AUVs in the simulation test

3 外场试验

为验证本文编队控制方法的实用性, 使用 3 台“探索 100” AUV^[17]进行了水下编队试验, 如图 4 所示。编队试验中期望队形为正三角形, 即 $L_1 = L_2 = L_3$ 。领航者保持在队伍的前方, 跟随者在后方两侧保持跟随, 试验方案如下: 3 台 AUV 定深航行, 预定航线为 3 条间距约 15 m 的由西向东平行直线, 航行距离约 500 m。试验中, 取 $R = 5\text{ m}$, $v_{\min} = 0.5\text{ m/s}$, $v_{\max} = 1.9\text{ m/s}$, $T_{\text{error}} = 1\text{ s}$ 。一共进行了多次编队试验, 每次试验结果差别不大, 由于本文篇幅有限, 任取其中一次实验数据具体分析, 如图 5-9。



图 4 试验中的 AUV
Fig.4 AUVs in the field test

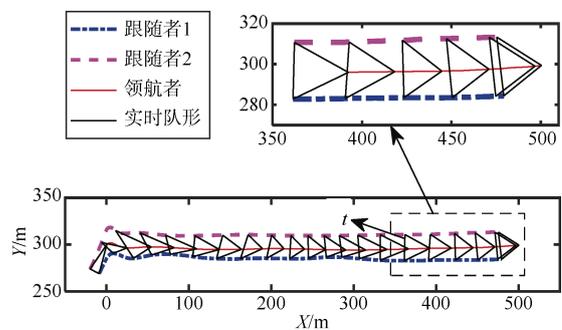


图 5 航行轨迹
Fig.5 Trajectory of AUVs

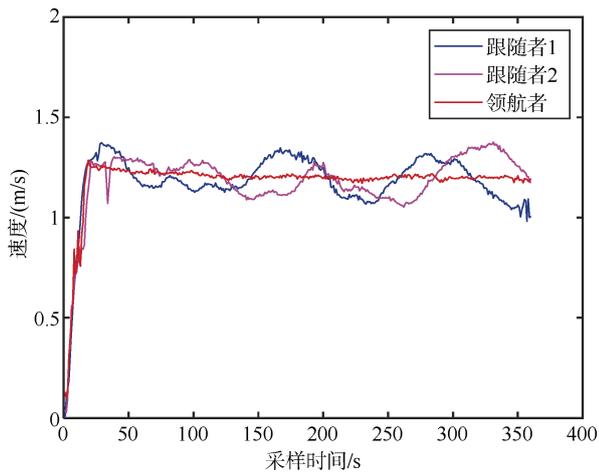


图 6 航行速度信息
Fig.6 Speed of AUVs

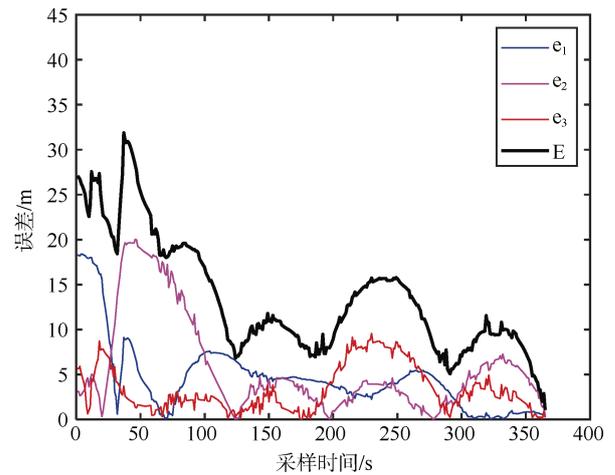


图 9 队形误差
Fig.9 Formation errors

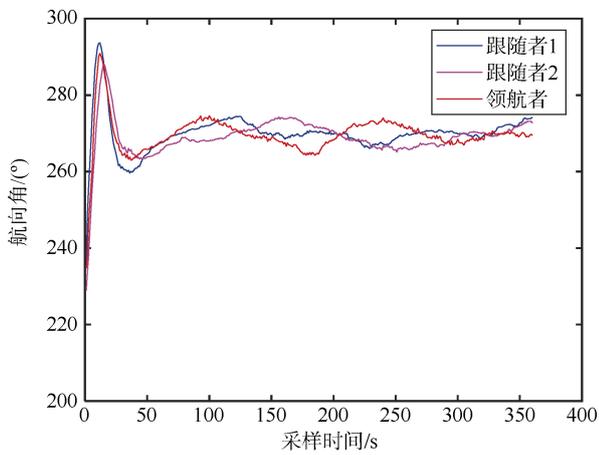


图 7 航向角信息
Fig.7 Heading of AUVs

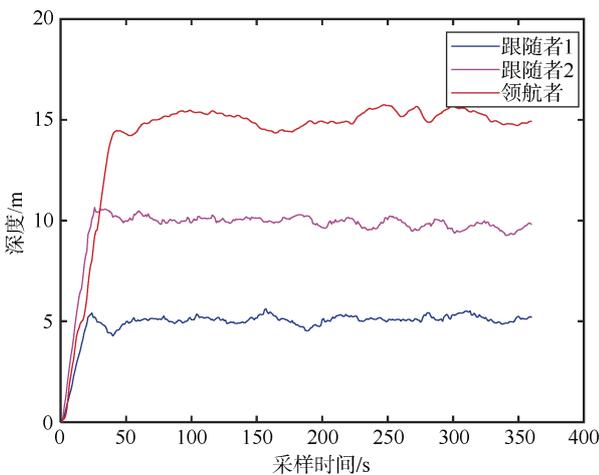


图 8 深度信息
Fig.8 Depth of AUVs

图 5 显示了多 AUV 的航行轨迹,可以看出正三角形队形逐渐形成并趋于稳定。图 6 为多 AUV 航行速度变化,可以看出跟随者 1 和跟随者 2 不断调整自身速度以保持期望队形。图 7 为多 AUV 航向信息,航向角基本与预设值相同,证明改进跟随领航者法中简化控制变量是简单有效的。图 8 为深度变化图,在垂直面上 3 台 AUV 分别在不同深度定深运动,且深度控制稳定,有利于减小对水平面上航向和速度控制的扰动。图 9 为队形误差图,可以看出三角形每条边的误差和总误差不断收敛,队形形成速度快,控制精度高,期望队形不断趋于稳定。

4 结束语

在水声通信的基础上,对跟随领航者编队控制方法进行改进,在 MATLAB 上对该方法进行仿真验证并确定关键控制参数,最后在湖上进行外场试验验证。试验结果表明:该方法在队形形成的快速性、维持队形的稳定性和队形控制的精确性等方面表现得很好。

AUV 导航精度对编队效果影响很大,本文中采用电子罗盘+多普勒计程仪的低成本组合导航方法,短距离内导航误差较小。未来将对 AUV 导航方式进行升级,拟采用惯导+多普勒计程仪的高精度导航方法,提高编队精度。

本文试验环境中水声通信效果较好,下一步计

划在水声通信效果较差甚至无法通信的环境中,对本文提出的方法进行改进,实现编队控制,最大限度的解决通信问题对编队控制的影响。

参考文献

- [1] 许真珍, 封锡盛. 多 UUV 协作系统的研究现状与发展[J]. 机器人, 2007, 29 (2): 186-192.
- [2] LI X, ZHU D Q, QIAN Y. A survey on formation control algorithms for multi-AUV system[J]. Unmanned Systems, 2014, 02 (04): 351-359.
- [3] 崔荣鑫, 严卫生, 徐德民, 等. 基于虚拟参考点的 AUV 编队控制[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33 (10): 53-57.
- [4] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1998, 14 (6): 926-939.
- [5] BURLUTSKIY N, TOUAHMI Y, LEE B H. Power efficient formation configuration for centralized leader-follower AUVs control[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2012, 17 (3): 315-329.
- [6] 阎述学, 李一平, 封锡盛. 基于水声通信的多 AUV 队形控制实现[J]. 控制工程, 2017, 24(S1): 118-122.
- [7] 冯之文, 姚尧, 苗艳, 等. 基于时延补偿的 AUV 领航跟随编队控制[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43 (1): 29-36.
- [8] 黄海, 张强, 张树迪, 等. 欠驱动 AUV 自适应编队控制策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36 (5): 633-637.
- [9] 潘无为, 姜大鹏, 庞永杰, 等. 人工势场和虚拟结构相结合的多水下机器人编队控制[J]. 兵工学报, 2017, 38 (2): 326-334.
- [10] LAPIERRE L, SOETANTO D, PASCOAL A. Coordinated motion control of marine robots[C]//6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. Girona: 2003.
- [11] GHABCHELOO R, AGUIAR A P, PASCOAL A, et al. Coordinated path-following control of multiple underactuated autonomous vehicles in the presence of communication failures[C]// The 45th Conference on Decision & Control. San Diego: 2006. IEEE, 2006.
- [12] GHABCHELOO R. Coordinated path following of multiple autonomous vehicles[D]// Thesis of Technical University of Lisbon. Lisbon: 2007.
- [13] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-Delays[C]// Transactions on Automatic Control. IEEE 2004.
- [14] 王银涛, 严卫生. 多自主水下航行器系统一致性编队跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(3): 379-384.
- [15] DAS B, SUBUDHI B, PATI B B. Cooperative formation control of autonomous underwater vehicles: an overview[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, 13 (3): 199-225.
- [16] LI, Y P, YAN S X. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles based on state feedback[C]// 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang: IEEE, 2014.
- [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.

(责任编辑: 肖楚楚)