

# 基于干扰观测器的 X 舵 AUV 零纵倾变深控制

李 杨<sup>1</sup>, 韩俊庆<sup>2</sup>, 缪旭弘<sup>1</sup>, 徐雪峰<sup>2</sup>

(1. 海军研究院, 北京 100161; 2. 天津航海仪器研究所九江分部, 天津 300131)

**摘 要:** 针对 X 舵 AUV 的零纵倾变深控制问题, 提出一种基于非线性干扰观测器的滑模控制方法。该方法首先在 AUV 垂直面操纵模型的基础上, 分别对深度与纵倾通道设计非线性干扰观测器, 观测 AUV 变深时深度与纵倾双通道的耦合干扰以及未建模动态, 并对其进行前馈补偿; 其次, 设计深度与纵倾双通道耦合控制器, 通过同时对深度与纵倾进行控制减小变深过程的纵倾变化, 实现 AUV 的零纵倾变深控制; 最后, 设计 X 舵的舵角分配算法, 实现十字舵向 X 舵的舵角指令转化。仿真结果表明, 本文提出的零纵倾变深控制算法能够有效地控制 AUV 完成高精度零纵倾变深航行。

**关键词:** X 舵 AUV; 变深控制; 非线性干扰观测器; 滑模控制; 舵角分配

**中图分类号:** U664.82 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2022)18-0073-05 **doi:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2022.18.016

## Zero-pitch depth control of X-rudder AUV based on disturbance observer

LI Yang<sup>1</sup>, HAN Jun-qing<sup>2</sup>, MIAO Xu-hong<sup>1</sup>, XU Xue-feng<sup>2</sup>

(1. Naval Research Institute, Beijing 100161, China; 2. Jiujiang Division, Tianjin Navigation Instruments Research Institute, Tianjin 300131, China)

**Abstract:** To solve the zero-pitch depth control of X-rudder AUV, a sliding mode control method based on nonlinear disturbance observer was proposed. Firstly, based on the vertical plane model of AUV, nonlinear disturbance observer was designed for depth and pitch channels respectively, and the coupling disturbance and unmodeled dynamics was observed, and feedforward compensation was carried out for them. Secondly, a dual-channel coupling controller of depth and pitch was designed to control the depth and pitch at the same time, to realize the zero-pitch depth control of AUV. Finally, the X-rudder angle allocation algorithm was designed to realize the instruction transformation from cross rudder to X-rudder. Simulation results show that the proposed zero-pitch depth control algorithm can make the AUV to complete the high precision zero-pitch depth control effectively.

**Key words:** X-rudder AUV; depth control; nonlinear disturbance observer; sliding mode control; angle allocation

## 0 引 言

自主水下航行器(AUV)相比于其他类型的水下平台,具有活动范围大、机动性好、安全、智能化等优点,在海底铺管、海底勘测、水下设备维修与维护等方面得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。如今随着 AUV 执行任务的复杂度越来越高,对 AUV 的操纵性能要求也越来越高。相比于十字舵, X 舵具有更高的操纵性,并且具有横滚控制能力,是未来 AUV 尾舵的发展趋势<sup>[2]</sup>。

然而,由于 X 舵特殊的布置方式,每个舵面都具有纵倾与航向的控制功能,相比于十字舵, X 舵的控制方式不直观<sup>[3]</sup>, AUV 在进行变深控制时,很难兼顾

水平面运动以及保证 AUV 以小纵倾方式平稳变深,因此研究一种有效的 X 舵 AUV 零纵倾变深操纵控制方法尤为重要。

目前,对于变深控制的大部分研究工作都是针对十字尾舵的 AUV。杨德成等<sup>[4]</sup>针对 AUV 在舵角与舵速约束下的深度控制问题提出一种基于模型预测控制的 AUV 深度控制方法,仿真结果表明该方法具有良好的动态控制性能。霍江航等<sup>[5]</sup>针对 AUV 运动过程中水动力参数摄动与外界干扰问题,基于 L1 自适应理论提出一种 AUV 深度控制器,仿真结果表明该控制器拥有良好动态响应的同时能够保证抗干扰能力与鲁棒性。绕志

收稿日期: 2021-11-26

作者简介: 李杨(1987-),男,博士,工程师,研究方向为船舶导航与操纵控制技术。

荣等<sup>[6]</sup>针对 AUV 在外部扰动与内部扰动下深度难以控制的问题,提出一种基于干扰观测器的自适应终端滑模控制方法,仿真结果表明此方法有着很强的抗干扰性。

本文根据十字舵 AUV 深度控制器的设计思路,提出一种 X 舵 AUV 的变深控制方法。该方法利用非线性干扰观测器来补偿深度与纵倾通道的耦合干扰与未建模动态,并设计深度与纵倾双通道耦合控制器,使首舵与尾舵联合控制深度与纵倾,提高深度与纵倾的控制精度,达到零纵倾变深的目的。设计 X 舵舵角分配算法,将尾舵指令分配到 4 个舵角上。仿真实验验证了该算法的有效性。

## 1 模型描述

由于 AUV 垂直面的运动与水平面的运动之前耦合作用很小,在研究变深控制问题时可忽略水平面运动,因此在 AUV 六自由度标准模型<sup>[7]</sup>基础上进行简化,得到 AUV 垂直面的非线性动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{w} = f_w + b_{wb}\delta_b + b_{ws}\delta_s + d_w, \\ \dot{q} = f_q + b_{qb}\delta_b + b_{qs}\delta_s + d_q, \\ \dot{z} = -u\sin\theta + w\cos\theta, \\ \dot{\theta} = q. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $w$ ,  $q$ ,  $z$ ,  $\theta$  分别为 AUV 的垂向速度、纵倾角速度、深度和纵倾角;  $u$  为 AUV 的纵向速度,变深航行时一般保持纵向速度不变;  $\delta_b$  为 AUV 的首舵舵角,  $\delta_s$  为 AUV 的虚拟尾舵舵角,可由 X 舵的 4 个舵角转化得到;  $d_w$  与  $d_q$  为 AUV 变深运动时垂向与纵倾通道的耦合干扰与未建模动态,其余参数项的表达式如下:

$$\begin{aligned} f_w &= \frac{a_3 f_3 + a_2 f_5}{a_1 a_3 - a_2 a_4}, & f_q &= \frac{a_4 f_3 + a_1 f_5}{a_1 a_3 - a_2 a_4}, \\ b_{wb} &= \frac{a_3 b_{b3} + a_2 b_{b5}}{a_1 a_3 - a_2 a_4}, & b_{ws} &= \frac{a_3 b_{s3} + a_2 b_{s5}}{a_1 a_3 - a_2 a_4}, \\ b_{qb} &= \frac{a_4 b_{b3} + a_1 b_{b5}}{a_1 a_3 - a_2 a_4}, & b_{qs} &= \frac{a_4 b_{s3} + a_1 b_{s5}}{a_1 a_3 - a_2 a_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: 各个动力学系数分别为

$$\begin{aligned} a_1 &= m - \frac{1}{2}\rho L^3 Z_{\dot{w}}, & a_2 &= \frac{1}{2}\rho L^4 Z_{\dot{q}}, \\ a_3 &= I_y - \frac{1}{2}\rho L^5 M_{\dot{q}}, & a_4 &= \frac{1}{2}\rho L^4 M_{\dot{w}}, \\ f_3 &= \frac{1}{2}\rho L^3 (Z_{\dot{q}} u q + Z_{w|q}|w|q|) + \frac{1}{2}\rho L^2 (Z_u u^2 + Z_w u w) + \\ & \quad \frac{1}{2}\rho L^2 (Z_{|w|} u |w| + Z_{w|w}|w|w|) + m u q. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_5 &= \frac{1}{2}\rho L^4 (M_{\dot{q}} u q + M_{w|q}|w|q|) + \frac{1}{2}\rho L^3 (M_u u^2 + M_w u w) + \\ & \quad \frac{1}{2}\rho L^3 M_{w|w}|w|w| - B z_B \sin(\theta), \\ b_{s3} &= \frac{1}{2}\rho L^3 Z_{|q|\delta_s} u |q| + \frac{1}{2}\rho L^2 Z_{\delta_s} u^2, \\ b_{s5} &= \frac{1}{2}\rho L^4 M_{|q|\delta_s} u |q| + \frac{1}{2}\rho L^3 M_{\delta_s} u^2, \\ b_{b3} &= \frac{1}{2}\rho L^2 Z_{\delta_b} u^2, & b_{b5} &= \frac{1}{2}\rho L^3 M_{\delta_b} u^2. \end{aligned}$$

式中:  $B$  为 AUV 的浮力,  $m$  为 AUV 质量,  $L$  为 AUV 长度,  $\rho$  为海水密度,其余参数为水动力参数。

## 2 控制器设计

本文的控制器设计分为 3 个部分: 1) 设计非线性干扰观测器,估计并补偿变深时深度与纵倾通道的耦合干扰与未建模动态; 2) 设计双通道耦合滑模控制器,实现 AUV 的零纵倾高精度变深控制,并引入饱和函数来替代符号函数,消除滑模控制的抖振问题; 3) 设计 X 舵舵角分配率,将尾舵指令分配到 X 舵的 4 个舵上。控制器的结构形式如图 1 所示。

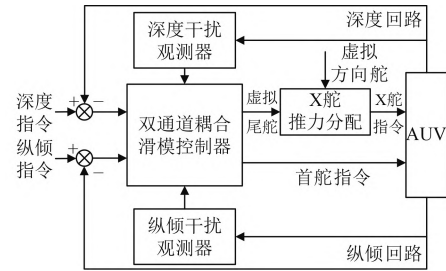


图 1 控制器结构框图

Fig. 1 Block diagram of controller

### 2.1 非线性干扰观测器设计

AUV 在变深航行过程中,为了保持艇内人员的舒适性,纵倾角一般很小。因此可将式 (1) 转化为:

$$\begin{cases} \ddot{z} = f_z + b_{wb}\delta_b + b_{ws}\delta_s + d_w, \\ \dot{q} = f_q + b_{qb}\delta_b + b_{qs}\delta_s + d_q, \\ \dot{z} = -u\theta + w, \\ \dot{\theta} = q. \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $f_z = -uq + f_w$ 。

为了补偿 AUV 变深过程中深度与纵倾通道的耦合干扰与未建模动态,设计深度与纵倾通道的非线性干扰观测器如下式:

$$\begin{cases} \dot{p}_z = -\beta_1 p_z - \beta_1^2 \dot{z} - \beta_1 (f_z + b_{wb}\delta_b + b_{ws}\delta_s), \\ \dot{d}_w = \beta_1 \dot{z} + p_z. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{p}_q = -\beta_2 p_q - \beta_2^2 q - \beta_2 (f_q + b_{qb} \delta_b + b_{qs} \delta_s), \\ \dot{\hat{d}}_q = \beta_2 q + p_q. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\hat{d}_w$ ,  $\hat{d}_q$  为深度与纵倾通道的干扰观测值;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  为观测器增益;  $p_z$ ,  $p_q$  为观测器的辅助变量。

以深度通道为例, 证明干扰观测器的收敛性。定义观测器误差  $\tilde{d}_w = d_w - \hat{d}_w$ , 考虑到 AUV 的变深航行是一个大惯性的慢过程, 因此假设变深过程中观测器误差变化率  $\dot{\tilde{d}}_w = 0$ , 则观测器误差导数为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}}_w &= \dot{d}_w - \dot{\hat{d}}_w = -\beta_1 \ddot{z} - \dot{p}_z = \\ &\beta_1 (f_z + b_{wb} \delta_b + b_{ws} \delta_s + d_w) + \\ &\beta_1 p_z + \beta_1^2 \dot{z} + \beta_1 (f_z + b_{wb} \delta_b + b_{ws} \delta_s) = \\ &-\beta_1 d_w + \beta_1 p_z + \beta_1^2 \dot{z} = \\ &-\beta_1 d_w + \beta_1 (\hat{d}_w - \beta_1 \dot{z}) = -\beta_1 \tilde{d}_w. \end{aligned} \quad (6)$$

求解可得  $\tilde{d}_w = e^{-\beta_1 t} \tilde{d}_w(0)$ , 干扰观测器呈指数收敛, 且收敛速度与观测器参数  $\beta_1$  有关,  $\beta_1$  越大收敛速度越快, 但过大的观测器增益会破坏控制器的稳定性, 因此参数调节时应综合考虑观测器的收敛速度与控制器的稳定性。

同理也可证得纵倾通道的非线性干扰观测器收敛。

## 2.2 滑模控制器设计

从式 (3) 可以看出, 首舵与尾舵同时控制 AUV 的深度与纵倾。为了简化控制器设计, 设计 2 个虚拟控制量对深度与纵倾通道进行解耦, 2 个虚拟量的表达式如下:

$$\begin{aligned} u_z &= b_{wb} \delta_b + b_{ws} \delta_s, \\ u_q &= b_{qb} \delta_b + b_{qs} \delta_s. \end{aligned} \quad (7)$$

则式 (3) 可转化为:

$$\begin{cases} \ddot{z} = f_z + u_z + \hat{d}_w, \\ \dot{q} = f_q + u_q + \hat{d}_q, \\ \dot{z} = -u\theta + w, \\ \dot{\theta} = q. \end{cases} \quad (8)$$

以深度通道为例, 定义深度与深度变化率的误差为:

$$e_z = z - z_c, \quad \dot{e}_z = \dot{z} - \dot{z}_c. \quad (9)$$

式中,  $z_c$  与  $\dot{z}_c$  为深度与深度变化率指令。

定义线性滑模面为:

$$s_z = \dot{e}_z + c_z e_z. \quad (10)$$

式中:  $c_z$  为可调参数, 满足  $c_z > 0$ 。

对式 (10) 求导得:

$$\dot{s}_z = \ddot{e}_z + c_z \dot{e}_z = \ddot{z} + u_z + \hat{d}_w - \ddot{z}_c + c_z \dot{e}_z. \quad (11)$$

使  $\dot{s}_z = 0$  可得出滑模控制的等效控制率为:

$$u_{zeq} = \ddot{z}_c - \hat{d}_w - f_z - c_z \dot{e}_z. \quad (12)$$

在滑模趋近率方面本文选择指数型趋近率作为切换控制率:

$$u_{zsmc} = -k_{z1} s_z - k_{z2} \text{sgn}(s_z). \quad (13)$$

式中:  $k_{z1}$ ,  $k_{z2}$  为滑模趋近率的参数, 均为正常数;  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数。

因此滑模控制器最终的控制率形式为:

$$\begin{aligned} u_z &= u_{zeq} + u_{zsmc} = \ddot{z}_c - \hat{d}_w - f_z - \\ &c_z \dot{e}_z - k_{z1} s_z - k_{z2} \text{sgn}(s_z). \end{aligned} \quad (14)$$

可以看出, 由于控制率 (14) 中符号函数的存在, 控制输出不连续, 这便是滑模控制会出现控制器输出抖振的原因。为了消除抖振, 这里引入饱和函数来替代符号函数:

$$\text{sat}(s_z) = \begin{cases} \text{sgn}(s_z), & s_z > \Delta_z, \\ s_z / \Delta_z, & s_z \leq \Delta_z. \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\Delta_z > 0$  为饱和函数的边界层厚度, 则式 (14) 可转化为:

$$u_z = \ddot{z}_c - \hat{d}_w - f_z - c_z \dot{e}_z - k_{z1} s_z - k_{z2} \text{sat}(s_z). \quad (16)$$

同理可得到纵倾通道控制率为:

$$u_q = -\hat{d}_q - f_q - c_q \dot{e}_q - k_{q1} s_q - k_{q2} \text{sat}(s_q). \quad (17)$$

式中:  $s_q = \dot{e}_q + c_q e_q$  为纵倾通道的滑模面函数;  $e_q = \theta - \theta_c$ ;  $\dot{e}_q = \dot{q}$  为纵倾角及其变化率误差;  $\theta_c$  为指令纵倾角;  $c_q$ ,  $k_{q1}$ ,  $k_{q2}$  为控制器参数。

## 2.3 舵角分配算法设计

在控制器解算出虚拟尾舵舵角指令后, 下一步将把虚拟尾舵舵角指令分配到 X 舵的 4 个舵角上, X 舵 4 个舵的编号如图 2 所示。

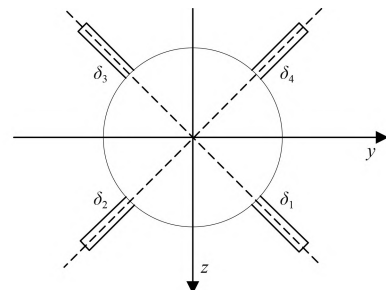


图 2 X 舵布局

Fig. 2 Layout of the X-rudder

参考文献 [8], X 舵角与十字舵角的转换关系为:

$$\begin{cases} \delta_r = \frac{1}{4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4), \\ \delta_s = \frac{1}{4}(\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4). \end{cases} \quad (18)$$

将式 (18) 转化为如下形式:

$$\tau_s = B\tau_x. \quad (19)$$

式中:  $\tau_s = [\delta_s, \delta_b]^T$ ,  $\tau_x = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4]^T$ , 控制效率矩阵  $B$  为:

$$B = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & -0.25 & 0.25 & -0.25 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

使用伪逆法设计 X 舵角分配算法, 其表达式如下:

$$\tau_x = B^T(BB^T)^{-1}\tau_s. \quad (21)$$

### 3 仿真验证

基于 X 舵六自由度操纵运动模型为被控对象, 采用文献 [9] 的 AUV 模型参数, 对控制器进行验证。为体现本文算法的控制性能, 将其与 PID 算法的仿真结果进行对比。仿真条件为: AUV 初始深度为 30 m, 航行速度为 8 kn, 目标深度为 60 m; 变深控制时不关注水平面的运动, 因此在舵角分配时设置方向舵虚拟舵角为 0, 即  $\delta_r = 0$ 。仿真结果如图 3 ~ 图 9 所示, 其中 NDO-SMC 表示本文算法。

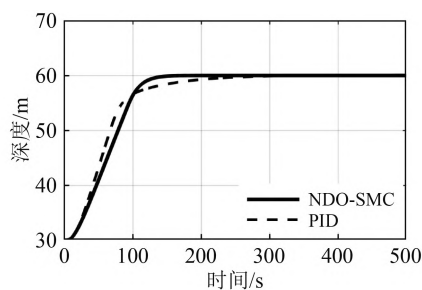


图 3 深度响应曲线

Fig. 3 The response curve of depth

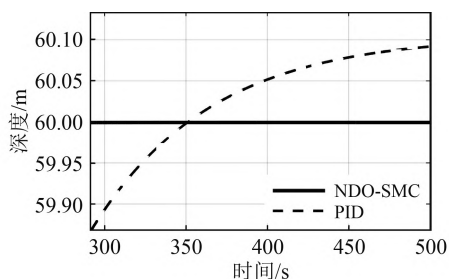


图 4 深度曲线局部放大图

Fig. 4 The detail view of depth curve

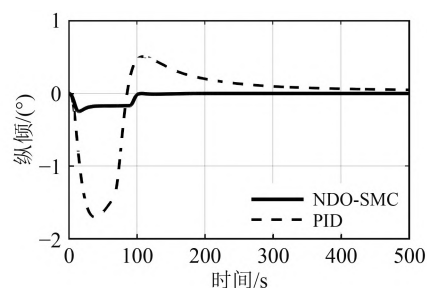


图 5 纵倾响应曲线

Fig. 5 The response curve of pitch

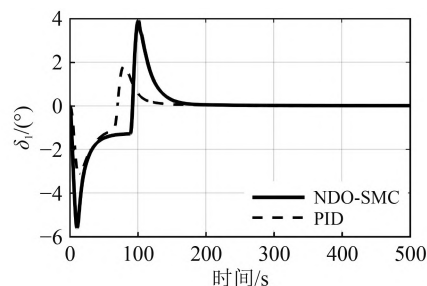


图 6 舵角 1 响应曲线

Fig. 6 The response curve of rudder 1

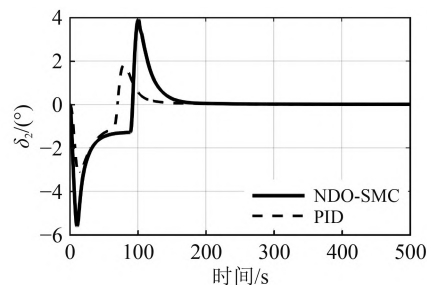


图 7 舵角 2 响应曲线

Fig. 7 The response curve of rudder 2

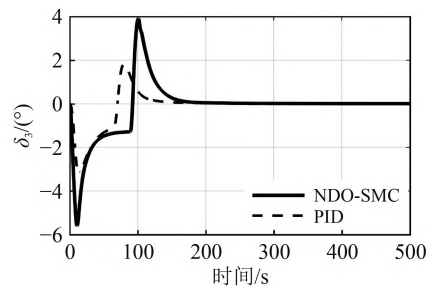


图 8 舵角 3 响应曲线

Fig. 8 The response curve of rudder 3

可以看出, 2 种控制算法均能够使 X 舵 AUV 完成变深控制, 证明了本文所设计舵角分配算法的有效性。

从图 3 可以看出, PID 控制器在初期有很快的响应速度, 在 90 s 左右收敛速度放缓, 而 NDO-SMC 控制器虽然在初期响应速度不如 PID, 但在 150 s 左右已收敛到指定深度, 因此相比与 PID 控制器, NDO-SMC 控制器深度收敛速度更快; 从图 4 中的深度曲线局部放



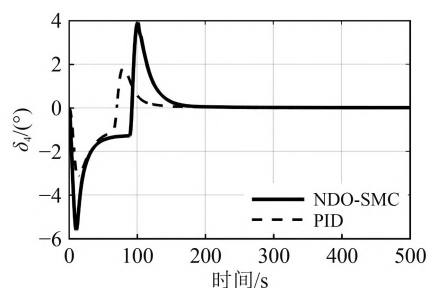


图 9 舵角 4 响应曲线

Fig. 9 The response curve of rudder 4

大图可以明显看出, 相比与相比与 PID 控制器, NDO-SMC 控制器有着更高的深度控制精度。

从图 5 的纵倾响应曲线可以看出, NDO-SMC 控制器使纵倾角在 100 s 左右收敛到 0, 调节过程中最大纵倾角为  $-0.25^\circ$ , 整个过程几乎保持零纵倾变深, 而 PID 控制器使 AUV 在变深时最大产生了  $-1.7^\circ$  的纵倾角, 且纵倾收敛速度较慢, 因此相比 PID 控制器, NDO-SMC 控制器有着更强的纵倾控制能力。

从图 6 ~ 图 10 的舵角响应曲线可以看出, 相比 PID 控制器, NDO-SMC 控制器的动舵幅度更大, 舵利用率更高, 更好地发挥了操舵系统的控制性能。

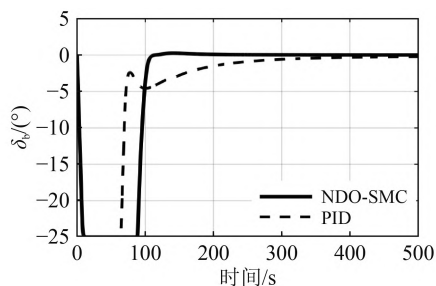


图 10 首舵响应曲线

Fig. 10 The response curve of bow rudder

#### 4 结 语

本文针对 X 舵 AUV 的零纵倾变深控制问题, 设计一种基于非线性干扰观测器的滑模控制器, 并采用伪逆法将控制器产生的舵角指令分配到 X 舵的 4 个舵角。仿真结果表明, 相比 PID 控制器, 本文控制器能够有效地提高变深控制中深度与纵倾的控制精度与收敛速度, 能够有效控制 X 舵型 AUV 零纵倾平稳变深航行。

#### 参考文献:

- [1] 黄琰, 李岩, 俞建成, 等. AUV 智能化现状与发展趋势 [J]. 机器人, 2020, 42(2): 215–231.  
HUANG Yan, LI Yan, YU Jian-cheng, et al. State of the art and development trends of AUV intelligence[J]. Robot, 2020, 42(2): 215–231.
- [2] 王小平. X 舵 AUV 控制分配优化与容错控制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [3] 李岳明, 王小平, 张军军, 等. 基于改进二次规划算法的 X 舵智能水下机器人控制分配 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(5): 524–531.  
LI Yue-ming, WANG Xiao-ping, ZHANG Jun-jun, et al. X-rudder AUV control allocation based on improved quadratic programming algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(5): 524–531.
- [4] 杨德成, 郭亦平, 任元洲, 等. 多约束模型预测控制在 AUV 深度控制中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(3): 120–124.  
YANG De-cheng, GUO Yi-ping, REN Yuan-zhou, et al. Application research of multi-constrained model predictive control in AUV depth control[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(3): 120–124.
- [5] 霍江航, 姜向远, 栾义忠, 等. 基于 L1 自适应理论的 AUV 深度控制器设计 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 150–157.  
HUO Jiang-hang, JIANG Xian-gyuan, LUAN Yi-zhong, et al. Design of AUV depth controller based on L1 adaptive theory[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 150–157.
- [6] 绕志荣, 董绍江, 王军, 等. 基于干扰观测器的 AUV 深度自适应终端滑模控制 [J]. 北京化工大学学报 (自然科学版), 2021, 48(1): 103–107.  
RAO Zhi-rong, DONG Shao-jiang, WANG Jun, et al. Adaptive terminal sliding mode control of AUV depth based on a disturbance observer[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science), 2021, 48(1): 103–107.
- [7] FOSSEN T. I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.
- [8] WANG Wen-jin, XIA Ying-kai, CHEN Ying, et al. motion control methods for x-rudder underwater vehicles: model based sliding mode and non-model based iterative sliding mode. [J] Ocean Engineering, 2020, 216: 1–16.
- [9] PRESTERO T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle[D]. Woods Hole Oceanographic Institution, Departments of Ocean and Mechanical Engineering, MIT, MA, 2001.