

基于非线性迭代滑模的欠驱动 UUV 三维航迹跟踪控制

贾鹤鸣^{1,2} 张利军³ 程相勤¹
边信黔¹ 严浙平¹ 周佳加¹

摘要 为实现欠驱动无人水下航行器 (Unmanned underwater vehicle, UUV) 在未知海流干扰作用下的三维航迹跟踪控制, 提出一种基于工程解耦思想设计的非线性迭代滑模航迹跟踪控制器. 基于虚拟向导的方法, 建立 UUV 空间航迹跟踪误差方程; 采用迭代方法设计非线性滑模控制器, 无需对 UUV 模型参数不确定部分和海流干扰进行估计, 避免了舵的抖振现象以及减小了稳态误差与超调问题. 仿真实验表明, 设计的控制器对欠驱动 UUV 系统的模型参数扰动及海流干扰变化不敏感, 且设计参数易于调节, 可以实现三维航迹的精确跟踪.

关键词 欠驱动无人水下航行器, 三维航迹跟踪, 非线性迭代滑模, 虚拟向导

DOI 10.3724/SP.J.1004.2012.00308

Three-dimensional Path Following Control for an Underactuated UUV Based on Nonlinear Iterative Sliding Mode

JIA He-Ming^{1,2} ZHANG Li-Jun³ CHENG Xiang-Qin¹
BIAN Xin-Qian¹ YAN Zhe-Ping¹ ZHOU Jia-Jia¹

Abstract In order to realize the three-dimensional path following control for underactuated (Unmanned underwater vehicle, UUV) under unknown ocean current, a nonlinear iterative sliding mode controller based on engineering decoupling is presented. The path following error equations in three-dimensions are established based on the virtual guide method. Then, a nonlinear feedback controller is designed based on iterative sliding modes, without estimating uncertainties of UUV model and ocean current disturbances. The problem of chattering of the hydroplane is circumvented, and the static error and overshoot are decreased. The results of simulation experiments indicate that the controller is robust against the systemic variations and time-varying current disturbances. Moreover, the parameters are easy to adjust, and the tracking control with high tracking precision can be achieved by the proposed control method.

Key words Underactuated unmanned underwater vehicle, three-dimensional path tracking, nonlinear iterative sliding mode, virtual guidance method

无人水下航行器 (Unmanned underwater vehicle, UUV) 三维航迹精确跟踪能力是实现水下勘探、打捞和施

工作业以及自身避障的重要技术前提^[1-2]. 由于本文研究的 UUV 具有欠驱动特性及加速度不可积的非完整约束条件^[3-4], 加之外界海流的干扰^[5-7], 从而令其实现三维航迹跟踪控制更加困难.

目前对于欠驱动 AUV 的航迹跟踪以水平面跟踪控制为主. Jalving 等基于传统 PID 控制方法设计了 AUV 航迹控制系统^[8], Wang 等提出基于自适应 PID 控制方法的 AUV 路径跟踪控制器^[9], 但 PID 控制方法受时变连续海流的干扰影响较大, 控制增益难以实时变化调节, 抗干扰能力较弱. Repoulias 等基于 Lyapunov 稳定性理论和反步法设计水平面航迹跟踪控制器^[10-12]; 针对常值海流干扰影响, 付江锋等提出基于以自由参考点为原点的 Serret-Frenet 坐标系下设计的直线跟踪控制器^[13] 和水平面航迹跟踪控制器^[14]. 以上控制算法大都依赖于精确的系统模型, 视控制算法的复杂程度, 对 AUV 动力模型都需要作出不同程度的假设, 设计过程中不易处理执行机构特性和系统的约束条件, 无法保证实际应用时的控制品质. 对于欠驱动 AUV 的三维航迹跟踪问题, 国外的研究文献也较少^[15], 且方法相对单一, 多数基于反步法进行控制器设计; 国内 Ding 等考虑了速度限制因素, 针对 ROV 的 5 自由度运动控制问题, 设计了鲁棒自适应控制器, 实现了保证控制输入有界条件下的精确跟踪^[16].

基于 Serret-Frenet 坐标系下的虚拟向导的跟踪方法已经在陆地移动机器人的路径跟踪控制中得到应用^[17-18], 文献 [7] 采用虚拟向导方法建立 AUV 垂直面的误差跟踪方程, 提出迭代滑模增量反馈的地形跟踪控制方法, 抑制了外界海流干扰. 本文将文献 [7] 中的二维运动模型推广到三维运动模型, 针对欠驱动 UUV 三维航迹跟踪控制问题, 基于虚拟向导的方法建立空间运动误差模型, 从操纵实际出发, 基于工程解耦设计思想, 利用方向舵控制欠驱动 UUV 的水平航迹偏差, 俯仰舵控制垂直航迹偏差, 桨控制航速, 并考虑实际 UUV 运动系统中存在的非线性水动力不确定性、约束条件和外界海流干扰, 并结合欠驱动 UUV 动力学模型和执行机构的动力特性, 提出非线性迭代滑模控制方法, 设计空间曲线航迹跟踪控制器, 以避免欠驱动 UUV 执行机构的抖振现象, 降低系统模型参数的扰动和外界干扰对跟踪控制精度的影响. 最后基于 UUV 虚拟仿真平台, 通过航迹制导器对一序列航迹点进行拟合产生指令航线, 并利用本文的控制方法进行了空间曲线跟踪控制仿真实验, 结果表明设计的控制器对非定常海流干扰有较好的抑制作用, 可以实现欠驱动 UUV 三维航迹的精确跟踪.

1 基于虚拟向导的 UUV 三维航迹跟踪误差方程

1.1 基于虚拟向导的运动学误差方程

本节的推导需采用如下假设: 1) 期望路径是确定的参数化曲线; 2) 虚拟向导的设计参数为正且有上确界; 3) UUV 速度为非负的, 即不能倒车航行; 4) 忽略横滚运动的影响.

图 1 为 UUV 空间航迹跟踪示意图. $\{I\}$, $\{F\}$ 和 $\{B\}$ 分别代表固定坐标系, Serret-Frenet 坐标系和 UUV 随体坐标系; U_B 为 UUV 的合成速度向量, 满足 $U_B = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$; $path$ 为多波束声纳探测生成的期望空间航迹曲线. 假设 Q 点为真实 UUV 的质点, 在 $\{I\}$ 坐标系下的位置向量和速度向量分别为: $Q = [\xi, \eta, \zeta]^T$, $\dot{Q} = [\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta}]^T$. Q 点的速度大小为: $U = \|\dot{Q}\| = \sqrt{\dot{Q}^T \dot{Q}}$, 为了用角度变量描述三维空间的方向, 定义航迹角和潜浮角分别为: $\gamma_Q = \arctan(\frac{\dot{\eta}}{\dot{\xi}})$, $\chi_Q = \arctan(\frac{\dot{\zeta}}{\sqrt{\dot{\xi}^2 + \dot{\eta}^2}})$.

收稿日期 2011-03-03 录用日期 2011-07-20
Manuscript received March 3, 2011; accepted July 20, 2011
国家自然科学基金 (61174047, 51179038), 教育部博士点基金 (20102304110003), 预研项目 (51316080301) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61174047, 51179038), Doctoral Fund of Ministry of Education (20102304110003), and Advanced Research Project (51316080301)
本期责任编辑 贾英民
Recommended by Associate Editor JIA Ying-Min
1. 哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001 2. 东北林业大学机电工程学院 哈尔滨 150040 3. 西北工业大学航海学院 西安 710072
1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040 3. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

UUV 在水下空间的运动过程中, 存在一定的冲角 α 和漂角 β ^[19], 因此 UUV 的艏向角 ϕ 和纵倾角 θ 为

$$\begin{aligned}\phi &= \gamma_Q - \beta \\ \theta &= \chi_Q - \alpha\end{aligned}\quad (1)$$

则 UUV 的运动学方程可以表示为速度向量 U_B 下的形式:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = U_B \cos \gamma_Q \cos \chi_Q \\ \dot{\eta} = U_B \sin \gamma_Q \cos \chi_Q \\ \dot{\zeta} = U_B \sin \chi_Q \\ \dot{\chi}_Q = q + \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma}_Q = \frac{r}{\cos \theta} + \dot{\beta} \end{cases}\quad (2)$$

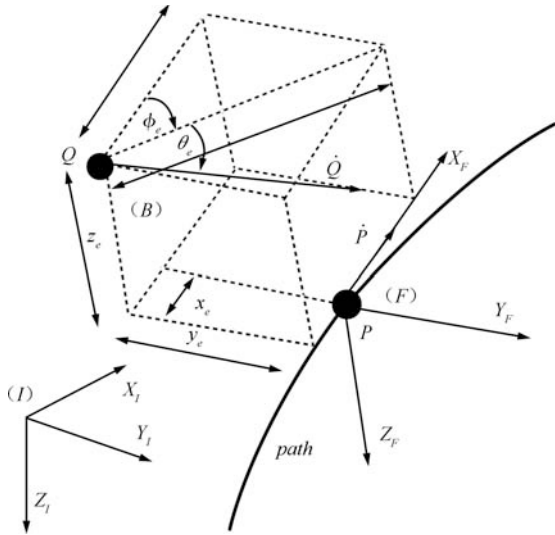


图 1 基于虚拟向导的三维航迹跟踪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of guidance-based path following in 3D

定义将 $\{B\}$ 分别沿着 y_B 轴旋转 γ_Q , 然后再将其沿 z_B 轴旋转角度 χ_Q 得到的坐标系为 $\{W\}$ 坐标系, 因此 $\{W\}$ 的 x_W 方向就和速度向量 U_B 方向一致, $W_{RB}(\gamma_Q, \chi_Q)$ 表示由 $\{B\}$ 坐标系到 $\{W\}$ 坐标系的转换矩阵. 假设期望航迹 $path$ 是以 μ 为参数变量的连续光滑曲线, p 点为 UUV 航迹规划曲线上具有一定速度 U_P 的虚拟向导, 考虑期望路径上任意一点的单位向量 T (路径切线方向), N (路径法线方向), 且存在 $B = T \times N$. 令 $c_1(\mu)$ 和 $c_2(\mu)$ 分别表示期望路径的曲率和挠率, 它们关于 μ 连续可导且有界, 则在 $\{I\}$ 中量测到的角速度在 $\{SF\}$ 中可表示为 $\omega_{SF}(\gamma_Q, \chi_Q) = (0, c_2(\mu)\dot{\mu}, c_1(\mu)\dot{\mu})^T$. 令 x_e, y_e, z_e 表示分别表示沿着 T, N 和 B 方向由 UUV 质心到 $\{SF\}$ 坐标系原点的位移, 表示为 $\varepsilon = (x_e, y_e, z_e)^T$, 基于上述定义, 则 $\{W\}$ 和 $\{SF\}$ 间的相对速度为 $\frac{d\varepsilon}{dt} = (\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{z}_e)^T$. 令 $R(\phi_e, \theta_e)$ 为 $\{W\}$ 和 $\{SF\}$ 间的旋转矩阵, 则有

$$R(\phi_e, \theta_e)W_{VB} = V_{SF} + \frac{d\varepsilon}{dt} + \omega_{SF} \times \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{其中, } R(\phi_e, \theta_e) = \begin{bmatrix} \cos \phi_e \cos \theta_e & -\sin \phi_e & \cos \phi_e \sin \theta_e \\ \sin \phi_e \cos \theta_e & \cos \phi_e & \sin \phi_e \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & 0 & \cos \theta_e \end{bmatrix},$$

$W_{VB} = (U_B, 0, 0)^T$ 为在 $\{W\}$ 坐标系下表示的 $\{I\}$ 中的合成速度, $V_{SF} = (U_p, 0, 0)^T$ 为在 $\{SF\}$ 坐标系下表示的 $\{I\}$ 中的虚拟向导 UUV 的速度.

设 ϕ_e, θ_e 为 $\{W\}$ 和 $\{SF\}$ 间的艏向角误差和纵倾角误差, 由于 $\{W\}$ 坐标系的 UUV 的角速度分别为 $r/\cos \theta + \dot{\beta}$ 和 $q + \dot{\alpha}$, 而 $\{SF\}$ 坐标系下的期望角速度分别为 $c_1(\mu)\dot{\mu}$ 和 $c_2(\mu)\dot{\mu}$, 则:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_e = \frac{r}{\cos \theta} + \dot{\beta} - c_1(\mu)\dot{\mu} \\ \dot{\theta}_e = q + \dot{\alpha} - c_2(\mu)\dot{\mu} \end{cases}\quad (4)$$

令 $U_B = U_d$, U_d 为 UUV 期望航行速度, 综合考虑式 (4) 可得 UUV 运动学误差模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_e = y_e c_1(\mu)\dot{\mu} - z_e c_2(\mu)\dot{\mu} + U_d \cos \phi_e \cos \theta_e - U_p \\ \dot{y}_e = -x_e c_1(\mu)\dot{\mu} + U_d \sin \phi_e \cos \theta_e \\ \dot{z}_e = x_e c_2(\mu)\dot{\mu} - U_d \sin \theta_e \\ \dot{\phi}_e = \frac{r}{\cos \theta} + \dot{\beta} - c_1(\mu)\dot{\mu} \\ \dot{\theta}_e = q + \dot{\alpha} - c_2(\mu)\dot{\mu} \end{cases}\quad (5)$$

最后我们来设计虚拟目标的速度并令其能够保证整个误差系统的稳定性, 基于 Lyapunov 稳定性理论, 设计虚拟目标的速度为

$$U_p = U_d \cos \phi_e \cos \theta_e + \kappa x_e \quad (6)$$

其中, $\kappa > 0$ 为增益参数. 虚拟目标的速度 U_p 依据前向位置误差的大小进行适当的调整, 从而避免了不连续的位置误差, 实现 UUV 对光滑路径的跟踪控制. 依据运动学关系求得满足假设条件 (1) 的非奇异路径参数变量为^[20]

$$\dot{\mu} = \frac{U_d \cos \phi_e \cos \theta_e + \kappa x_e}{\sqrt{x_p'^2 + y_p'^2 + z_p'^2}} \quad (7)$$

存在 $\phi_e = \arctan\left(-\frac{y_e}{\Delta y}\right)$, $\theta_e = \arctan\left(\frac{z_e}{\Delta z}\right)$, 代入式 (6) 可得:

$$U_p = U_d \frac{\Delta y}{\sqrt{y_e^2 + \Delta y^2}} \frac{\Delta z}{\sqrt{z_e^2 + \Delta z^2}} + \kappa x_e \quad (8)$$

式中, $\Delta y, \Delta z$ 为附加的满足假设条件 (2) 的有界变量^[21].

1.2 UUV 动力学方程

本文研究对象 UUV 配置舵螺旋桨以提供纵向推力, 垂直舵用于实现航向控制, 水平舵实现纵倾控制或深度控制. 利用三个执行机构来实现 UUV 的六自由度三维运动, 即控制输入维数小于系统维数, 属于典型的欠驱动系统, 加之存在外界海流干扰, 则使其运动控制器的设计变得更加复杂.

欠驱动 UUV 空间运动的动力学方程可描述为^[22]

$$\begin{cases} m_{11}\dot{u} = m_{vr}vr + m_{wq}wq + d_u + X_{prop} + \omega_1 \\ m_{22}\dot{v} = m_{ur}ur + d_v + \omega_2 \\ m_{33}\dot{w} = m_{uq}uq + d_w + \omega_3 \\ m_{44}\dot{q} = d_q + M_{prop} + \omega_4 \\ m_{55}\dot{r} = d_r + N_{prop} + \omega_5 \end{cases}\quad (9)$$

式中, $m_{(\cdot)}$ 为 UUV 质量和附加质量, d_u, d_v, d_w, d_q, d_r 为非线性水动力阻尼项, X_{prop}, M_{prop} 和 N_{prop} 分别表示推进器推力, 俯仰舵和方向舵作用力矩, $\omega_{(\cdot)}$ 为外界干扰力和力矩.

1.3 执行机构模型

欠驱动 UUV 要获得良好的运动控制品质, 不仅要依赖先进的控制算法, 还需考虑伺服系统的动态特性, 所以进行运动实时仿真时必须考虑主机特性^[23]. 本文研究对象欠驱动 UUV 采用艏部两个螺旋桨推进器实现其前向航速控制, 其模型实验结果表明主机转速变化率与主机时间常数相关, 可采用一阶惯性模型描述主机转速特性:

$$\dot{n} = \frac{K_M(n_r - n)}{T_M} \quad (10)$$

式中, K_M 为控制增益; n 为推进器转速, 右旋为正; n_r 为转速指令; T_M 为推进器时间常数. 依据欠驱动 UUV 水动力实验结果可知, 螺旋桨推力的计算式为^[24]

$$X_{\text{prop}} = C_n n |n| \quad (11)$$

式中, C_n 为推力-转速系数. 研究对象欠驱动 UUV 装配了两个舵: 一个是控制航向的方向舵; 另外一个控制纵倾和航行深度的俯仰舵. 规定欠驱动 UUV 方向舵右舵为正, 俯仰舵下舵为正. 在欠驱动 UUV 实际操舵过程一般舵角不超过 35° , 并且舵角响应速度有限 (从零舵角到满舵角所用的时间约为 $3.5\text{s} \sim 4\text{s}$). 由欠驱动 UUV 模型实验可得其舵机模型为

$$\dot{\delta}_s = \frac{K_{Es}(\delta_{sd} - \delta_s)}{T_{Es}} \quad (12)$$

$$\dot{\delta}_r = \frac{K_{Er}(\delta_{rd} - \delta_r)}{T_{Er}} \quad (13)$$

式中, δ_s 和 δ_r 分别表示俯仰舵和方向舵的舵角; K_{Es} 和 K_{Er} 为舵机控制增益; δ_{sd} 和 δ_{rd} 为舵角控制指令; T_{Es} 和 T_{Er} 为舵机时间常数. 考虑操舵本身产生的阻力、升力和力矩, 不计及舵的相互影响等其他因素, 则作用在欠驱动 UUV 上的力矩为

$$\begin{aligned} M_{\text{prop}} &= \frac{1}{2} \rho L^4 M'_{|q|\delta_s} u |q| \delta_s + \frac{1}{2} \rho L^3 M'_{\delta_s} u^2 \delta_s \\ N_{\text{prop}} &= \frac{1}{2} \rho L^4 N'_{|r|\delta_r} u |r| \delta_r + \frac{1}{2} \rho L^3 N'_{\delta_r} u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $M'_{|q|\delta_s}$, M'_{δ_s} , $N'_{|r|\delta_r}$, N'_{δ_r} 为 UUV 的非线性水动力阻尼系数.

2 UUV 三维航迹跟踪控制器设计及稳定性分析

2.1 控制目标

控制目标: 设计非线性迭代滑模控制器 (15), (17) 和 (19), 螺旋桨转速输入指令 (16), 舵机输入指令 (18) 和 (20), 基于式 (11) 和 (14) 求得螺旋桨推力 X_{prop} , 俯仰舵力矩 M_{prop} 和方向舵力矩 N_{prop} 驱动 UUV 航行, 使得 UUV 运动学误差方程 (5) 中的: $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} y_e = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} z_e = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_e = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e = 0$, 进而实现欠驱动 UUV 对空间航迹路径的精确跟踪.

2.2 基于迭代滑模的 UUV 三维航迹跟踪控制器设计

迭代滑模设计思想为将系统的跟踪误差经由滑模面通过一系列一阶低通滤波器而获得, 直至迭代获得最终的滤波器的输出, 此时将系统的高阶跟踪问题转化为一组低阶镇定问题的迭代^[25]. 因此基于工程解耦的思想针对欠驱动 UUV 的三个控制通道分别设计非线性迭代滑模控制器. 三个通道

的滑模面分别用 s_1^1 , s_2^1 和 s_3^1 表示. 针对误差方程 (5), 利用推进器来控制欠驱动 UUV 纵向位移偏差 x_e 和航速 u , 基于非线性滑模的航迹跟踪控制器可设计为

$$\begin{cases} s_1^1(x_e) = k_1^1 \tanh(k_2^1 x_e) + \dot{x}_e \\ s_2^1(s_1^1) = k_3^1 \tanh(k_4^1 s_1^1) + \dot{s}_1^1 \\ \dot{n} = -k_5^1 s_2^1 - k_6^1 \text{sgn}(s_2^1) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $k_1^1, k_2^1, k_3^1, k_4^1, k_5^1, k_6^1 \in \mathbf{R}^+$ 为设计参数, 令 $K^1 = [k_1^1, k_2^1, k_3^1, k_4^1, k_5^1, k_6^1]$. 由推进器工作特性 (10) 可得螺旋桨转速的输入指令为

$$n_r = n - T_M (k_5^1 s_2^1 + k_6^1 \text{sgn}(s_2^1)) \quad (16)$$

对于垂向路径偏差 z_e 和纵倾偏差 θ_e , 采用如下的迭代设计和增量反馈, 利用欠驱动 UUV 俯仰舵进行控制:

$$\begin{cases} s_1^2(z_e) = k_1^2 \tanh(k_2^2 z_e) + \dot{z}_e \\ s_2^2(s_1^2, \theta_e) = \theta_e + k_3^2 \int \tanh(s_1^2) dt \\ s_3^2(s_2^2) = k_4^2 \tanh(s_2^2) + \dot{s}_2^2 \\ s_4^2(s_3^2) = k_5^2 \tanh(s_3^2) + \dot{s}_3^2 \\ \dot{\delta}_s = -k_6^2 s_4^2 - k_7^2 \text{sgn}(s_4^2) \end{cases} \quad (17)$$

式中, $k_1^2, k_2^2, k_3^2, k_4^2, k_5^2, k_6^2, k_7^2 \in \mathbf{R}^+$ 为设计参数, $K^2 = [k_1^2, k_2^2, k_3^2, k_4^2, k_5^2, k_6^2, k_7^2]$. 考虑舵机工作特性 (12), 可得舵机输入指令为

$$\delta_{sd} = \delta_s - T_{Es} (k_6^2 s_4^2 + k_7^2 \text{sgn}(s_4^2)) \quad (18)$$

对于横向路径偏差 y_e 和艏向偏差 ϕ_e , 采用如下的迭代设计和增量反馈, 利用欠驱动 UUV 方向舵进行控制:

$$\begin{cases} s_1^3(y_e) = k_1^3 \tanh(k_2^3 y_e) + \dot{y}_e \\ s_2^3(s_1^3, \phi_e) = \phi_e + k_3^3 \int \tanh(s_1^3) dt \\ s_3^3(s_2^3) = k_4^3 \tanh(s_2^3) + \dot{s}_2^3 \\ s_4^3(s_3^3) = k_5^3 \tanh(s_3^3) + \dot{s}_3^3 \\ \dot{\delta}_r = -k_6^3 s_4^3 - k_7^3 \text{sgn}(s_4^3) \end{cases} \quad (19)$$

式中, $k_1^3, k_2^3, k_3^3, k_4^3, k_5^3, k_6^3, k_7^3 \in \mathbf{R}^+$ 为设计参数, $K^3 = [k_1^3, k_2^3, k_3^3, k_4^3, k_5^3, k_6^3, k_7^3]$. 考虑舵机工作特性 (13), 可得舵机输入指令为

$$\delta_{rd} = \delta_r - T_{Er} (k_6^3 s_4^3 + k_7^3 \text{sgn}(s_4^3)) \quad (20)$$

2.3 稳定性分析

定理 1. 基于 Lyapunov 稳定性理论, 考虑欠驱动 UUV 系统运动学方程 (5) 和基于非线性滑模增量反馈的地形跟踪控制器 (15)~(20), 则欠驱动 UUV 的纵向路径跟踪误差 x_e , 垂向路径跟踪误差 z_e 和纵倾角跟踪误差 θ_e , 横向路径跟踪误差 y_e 和纵倾角跟踪误差 ϕ_e 渐近稳定.

证明. 1) 纵向路径跟踪误差稳定性

由式 (15), 利用非线性滑模 s_1^1 和 s_2^1 的迭代设计思想, 对偏差 x_e 的控制即转化为对零阶系统 s_2^1 的镇定控制问题.

选取 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2} (s_2^1)^2$, 求导得:

$$\dot{V}_1 = s_2^1 \dot{s}_2^1 = s_2^1 \frac{\partial s_2^1}{\partial N} \dot{N} \quad (21)$$

将 s_2^1 展开:

$$s_2^1 = k_3^1 \tanh(k_4^1 s_1^1) + \frac{k_1^1 k_2^1 \dot{x}_e}{\cosh^2(k_2^1 x_e)} + \ddot{x}_e \quad (22)$$

忽略与转速 N 无关的变量, 上式两边对 N 求导:

$$\frac{\partial s_2^1}{\partial N} = \frac{\partial \ddot{x}_e}{\partial N} = \frac{\partial}{\partial N} (\dot{U}_d \cos \phi_e \cos \theta_e) \quad (23)$$

由于欠驱动 UUV 无法以倒车方式进行地形跟踪, 从而保证 $\dot{U}_d > 0$, 且 $\theta_e \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, 则 $\frac{\partial s_2^1}{\partial N} \geq 0$. 由式 (15) 和 (21) 可得:

$$s_2^1 \dot{N} = -k_5^1 (s_2^1)^2 - k_6^1 |s_2^1| \leq 0 \quad (24)$$

进而求得: $\dot{V}_1 = s_2^1 \dot{s}_2^1 \leq 0$.

由式 (15) 可以看出, 由于双曲正切、余切函数严格有界 (后者为下确界), 且系统可控, 一定存在 $k_1^1, k_2^1, k_3^1, k_4^1, k_5^1, k_6^1 \in \mathbf{R}^+$ 以及转速 n_r , 满足 $s_2^1 = 0$. 依据增量反馈定理可知, 假设系统外界干扰为理想光滑情况, 增量反馈控制律 (16) 可令 s_2^1 稳定. 根据 s_1^1 和 $s_2^1 V_1 \geq 0$ 为半负定的, 由 Barbalat 引理可得 $t \rightarrow \infty$ 时 $s_2^1 \rightarrow 0$, 即纵向路径跟踪误差 x_e 的渐近稳定性得证.

2) 垂向路径跟踪误差和纵倾角跟踪误差的稳定性
选取 Lyapunov 函数 $V_2 = \frac{1}{2}(s_4^2)^2$, 求导得:

$$\dot{V}_2 = s_4^2 \dot{s}_4^2 = s_4^2 \frac{\partial s_4^2}{\partial \delta_s} \dot{\delta}_s \quad (25)$$

将 s_4^1 展开:

$$\begin{aligned} s_4^2 &= k_5^2 \tanh(s_3^2) + \frac{k_4^2 (q + k_3^2 \tanh(s_1^2))}{(\cosh(s_2^2))^2} + \\ &\frac{k_3^2 \frac{k_1^2 k_2^2 \dot{z}_e}{(\cosh(k_2^2 z_e))^2} + \ddot{z}_e}{(\cosh(s_1^2))^2} + \\ &\dot{q} + \ddot{\alpha} - c_2(\mu) \dot{\mu}^2 - c_2(\mu) \ddot{\mu} \end{aligned} \quad (26)$$

上式两边对 δ 求导:

$$\frac{\partial s_4^2}{\partial \delta_s} = \frac{\partial M_{prop}}{\partial \delta_s} + k_3^2 \frac{\partial (c_2(\mu) \dot{\mu} x_e - U_d \sin \theta_e)}{\partial \delta_s} \quad (27)$$

由三角函数和双曲三角函数的有界性可知, 存在 k_3^2 满足: $\frac{\partial s_4^2}{\partial \delta_s} > 0$.

由式 (17) 和 (25) 可得:

$$s_4^2 \dot{\delta}_s = -k_6^2 (s_4^2)^2 - k_7^2 |s_4^2| \leq 0 \quad (28)$$

解得: $\dot{V}_2 = s_4^2 \dot{s}_4^2 \leq 0$. 依据式 $\dot{\delta}_s = -k_6^2 s_4^2 - k_7^2 \text{sgn}(s_4^2)$, 双曲正切、余切函数严格有界 (后者为下确界), 一定存在 $k_1^2, k_2^2, k_3^2, k_4^2, k_5^2, k_6^2, k_7^2 \in \mathbf{R}^+$ 及舵角 δ_{sd} , 满足 $s_4^2 = 0$. 依据增量反馈定理, 在系统外界干扰足够光滑的情况下, 增量反馈控制律 (18) 可以令 s_4^2 稳定. 根据 s_1^2, s_2^2, s_3^2 和 s_4^2 的定义, 当时 \dot{V}_2 为半负定的, 由 Barbalat 引理可得 $t \rightarrow \infty$ 时 $s_4^2 \rightarrow 0$, 即垂向路径跟踪误差 z_e 和纵倾角跟踪误差 θ_e 的渐近稳定性得证.

横向路径跟踪误差和艏角跟踪误差的稳定性证明同 2). \square

3 仿真研究

仿真实验对象为哈尔滨工程大学北枫海洋装置与控制技术研究所自主研发的某型欠驱动 UUV, 基于半物理仿真平台, 针对由实测水动力系数构建的 6 自由度非线性模型, 对上述研究的基于迭代滑模的控制方法的正确性和有效性进行验证. 验证了 UUV 在非正常海流干扰条件下对三维航迹的精确跟踪能力.

针对连续时变的海流干扰进行正弦空间曲线路径跟踪控制仿真, 正弦空间曲线如下所示 (单位: m):

$$\begin{cases} y_d = 100 \sin\left(\frac{x_d}{200}\pi\right) \\ z_d = 35 + 30 \sin\left(\frac{x_d}{200}\pi\right) \end{cases} \quad (29)$$

连续时变海流流速为 (单位: kn):

$$u_{cur} = 3 - \frac{3}{65}z, \quad 0 \leq z \leq 65 \quad (30)$$

流向为 0° (与 X 轴夹角), 为欠驱动 UUV 的深度. 设欠驱动 UUV 初始位置为 $(x, y, z) = (0, 0, 35)$ m, 初始姿态角为 $(\varphi, \theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, 初始航速为 $(u, v, w) = (0, 0, 0)$ kn. 期望航速为 $u_d = 4$ kn, 考虑欠驱动 UUV 刚体的长度和跟踪曲线特性, 给定虚拟目标的增益参数 $\kappa = 0.05$, 初始位置 $(x_P, y_P, z_P) = (0, 0, 35)$ m. 选取控制增益为

$$K^1 = [1.2, 0.06, 0.06, 0.03, 0.03, 135]$$

$$K^2 = [0.8, 0.4, 0.4, 0.7, 0.7, 98.5, 0.05]$$

$$K^3 = [0.6, 0.3, 0.2, 0.5, 0.5, 67, 0.2]$$

UUV 主推进器参数 $T_M = 1$ s, $C_n = 0.87$.

为验证本文所设计控制器的性能, 以 PID 控制器对欠驱动 UUV 空间曲线路径跟踪的仿真数据加以比对和分析. 如图 2 所示: 两种控制器均可实现欠驱动 UUV 在时变海流干扰下的路径跟踪控制, 但是如图 3 和图 4 的 XY 、 XZ 平面路径跟踪曲线可知, 基于增量反馈的 ISMC 的平面路径跟踪误差明显小于 PID 控制器下的路径跟踪误差, 表明 ISMC 控制器针对海流干扰具有较强的鲁棒性. 由图 5 的路径跟踪

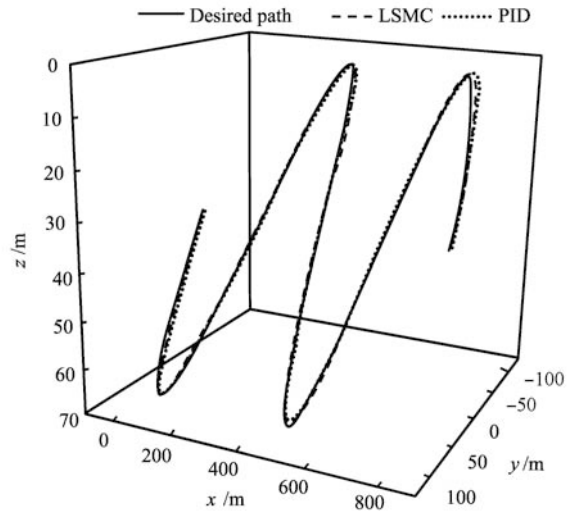


图 2 欠驱动 UUV 空间航迹跟踪

Fig. 2 Underactuated UUV Spatial path following

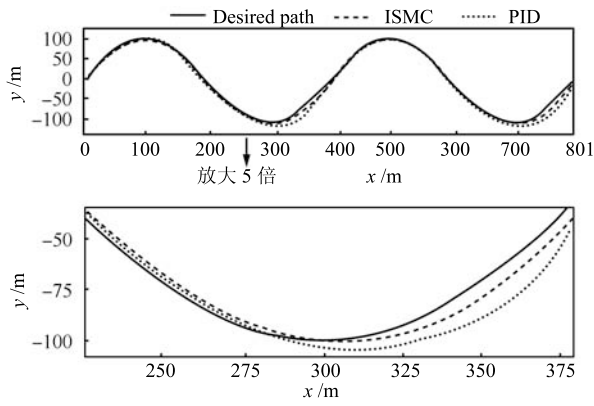


图3 XY平面路径跟踪
Fig.3 XY plane path following

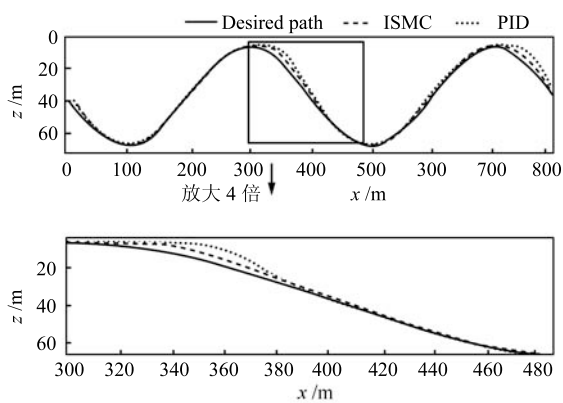


图4 XZ平面路径跟踪
Fig.4 Underactuated UUV spatial path following

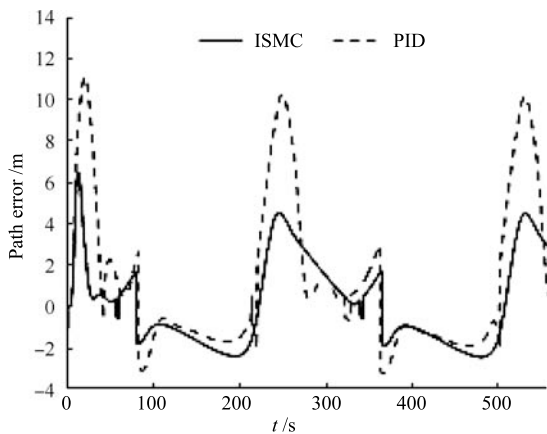


图5 路径跟踪误差
Fig.5 Path following errors

差可知: 在海流最大时, 基于增量反馈 ISMC 的路径跟踪最大误差为 6.5 m, 路径跟踪标准误差为 2.1 m; 而 PID 控制器下的路径跟踪最大误差为 11 m, 路径跟踪标准误差为 3.8 m.

图 6 和图 7 为航速误差曲线和推进器响应曲线, 基于增量反馈 ISMC 的航速控制存在 7% 超调, 而 PID 控制器的航速控制不仅具有 13% 的超调量, 而且推进器在海流干扰

较大的情况下出现振荡现象. 图 8 和图 9 分别表示艏向角误差曲线和方向舵响应曲线. 基于迭代滑模设计的控制器在海流干扰较大的情况下, 出现小幅波动, 在海流较小的情况下能够保持艏向角的稳定, 具有较强的鲁棒性; 而 PID 控制器下的艏向控制在海流较大的情况下, 出现振荡现象, 不能实现艏向角的快速稳定, 而且方向舵出现振荡现象, 抗干扰能力较弱. 图 10 和图 11 分别表示纵倾角误差曲线和俯仰舵响应曲线, 水平面附近, 此时纵倾角控制受到海流干扰较大, 变化比较剧烈, 因此两种控制器下的俯仰舵都达到了饱和状态,

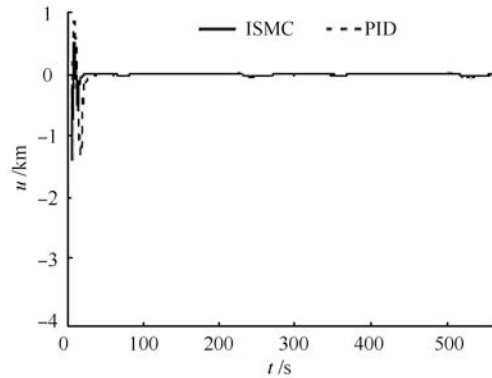


图6 航速跟踪曲线
Fig.6 Speed tracking errors

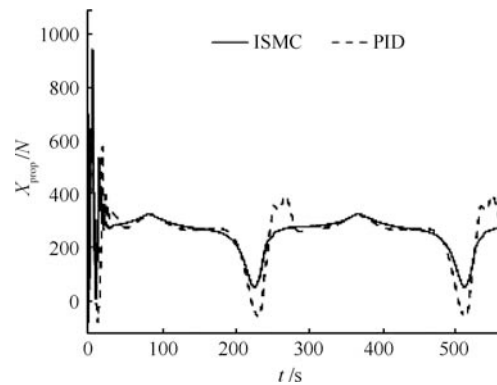


图7 推进器响应曲线
Fig.7 Transient responses of thruster

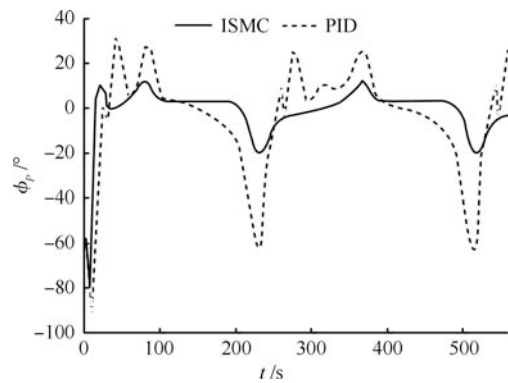


图8 艏向角误差曲线图
Fig.8 Heading tracking errors

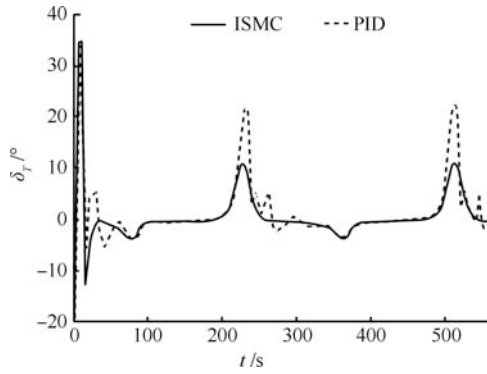


图 9 方向舵舵角响应曲线

Fig. 9 Transient responses of rudder

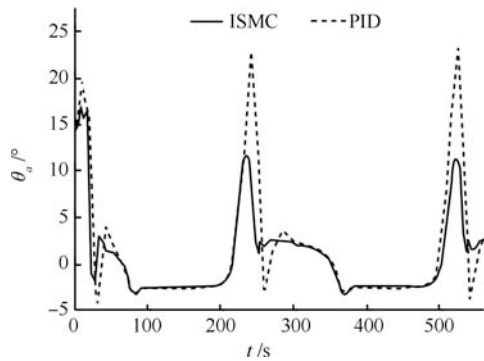


图 10 纵倾角误差曲线

Fig. 10 Pitch tracking errors

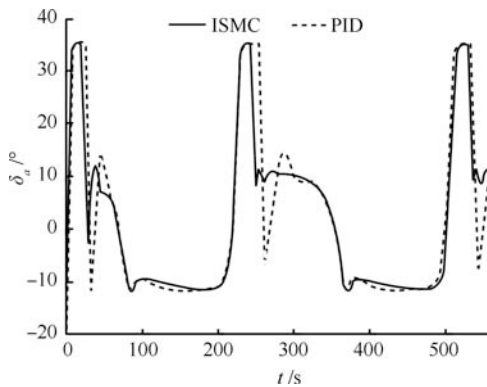


图 11 俯仰舵舵角响应曲线

Fig. 11 Transient responses of elevator

但是, 基于增量反馈的迭代滑模控制器能够更好地抑制干扰, 快速平缓而无超调地实现欠驱动 UUV 的纵倾角控制。图 12 为虚拟目标 P 点的航速曲线。

4 结论

通过对欠驱动 UUV 航迹曲线跟踪的研究, 基于虚拟向导的思想建立空间航迹跟踪误差方程, 实现了航迹曲线特性与 UUV 运动方程的结合, 为实现光滑曲线的跟踪奠定了理论基础; 考虑 UUV 执行机构模型和动力学方程, 设计了非线性迭代滑模控制器, 此控制器不仅能够较好地抑制海流的干

扰, 而且能够避免舵控制的抖振现象以及航速、艏向角和纵倾角反馈控制的稳态误差与超调问题, 实现了欠驱动 UUV 在变海流干扰作用下的三维航迹跟踪控制。

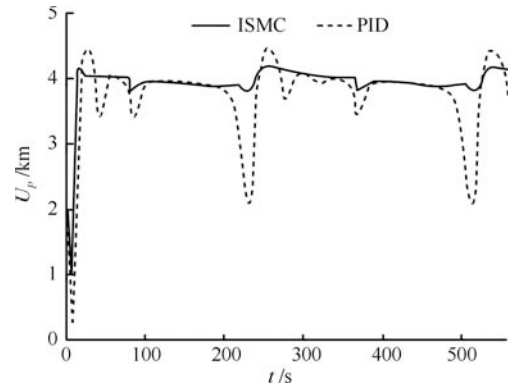


图 12 虚拟目标航速曲线

Fig. 12 Speeds of virtual target

References

- Jiang Xin-Song, Feng Xi-Sheng, Wang Li-Tang. *Unmanned Underwater Vehicles*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000. 35–40
(蒋新松, 封锡盛, 王隼棠. 水下机器人. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000. 35–40)
- Xu Yu-Ru, Xiao Kun. Technology development of autonomous ocean vehicle. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(5): 518–521
(徐玉如, 肖坤. 智能海洋机器人技术进展. 自动化学报, 2007, **33**(5): 518–521)
- Wang Y T, Yan W S, Gao B, Cui R X. Backstepping-based path following control of an underactuated autonomous underwater vehicle. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Information and Automation*. Zhuhai, China: IEEE, 2009. 466–471
- Wang Fang, Wan Lei, Li Ye, Su Yu-Min, Xu Yu-Ru. A survey on development of motion control for underactuated AUV. *Shipbuilding of China*, 2010, **51**(2): 227–241
(王芳, 万磊, 李晔, 苏玉民, 徐玉如. 欠驱动 AUV 的运动控制技术综述. 中国造船, 2010, **51**(2): 227–241)
- Refsnes J E, Sorensen A J, Pettersen K Y. Model-based output feedback control of slender-body underactuated AUVs: theory and experiments. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(5): 930–946
- Tang Xu-Dong, Pang Yong-Jie, Li Ye, Zhang He. Chaotic process neuron control for AUVs. *Control and Decision*, 2010, **25**(2): 213–217
(唐旭东, 庞永杰, 李晔, 张赫. 基于混沌过程神经元的水下机器人运动控制方法. 控制与决策, 2010, **25**(2): 213–217)
- Bian Xin-Qian, Cheng Xiang-Qin, Jia He-Ming, Yan Zhe-Ping, Zhang Li-Jun. A bottom-following controller for underactuated AUV based on iterative sliding and increment feedback. *Control and Decision*, 2011, **26**(2): 289–292
(边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 严浙平, 张利军. 基于迭代滑模增量反馈的欠驱动 AUV 的地形跟踪控制. 控制与决策, 2011, **26**(2): 289–292)

- 8 Jalving B, Storkersen N. The control system of an autonomous underwater vehicle. In: Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Control Applications. Glasgow, UK: IEEE, 1994. 851–856
- 9 Wang B, Su Y M, Wan L, Sun Y. Adaptive PID control system for an autonomous underwater vehicle. *High Technology Letters*, 2011, **17**(1): 7–12
- 10 Repoulas F, Papadopoulos E. Trajectory planning and tracking control design of underactuated AUVs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain: IEEE, 2005. 1610–1615
- 11 Repoulas F, Papadopoulos E. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs. *Ocean Engineering*, 2007, **34**(11–12): 1650–1667
- 12 Lapierre L, Soetanto D. Nonlinear path-following control of an AUV. *Ocean Engineering*, 2007, **34**(11–12): 1734–1744
- 13 Fu Jiang-Feng, Yan Wei-Sheng, Zhao Tao. Line tracking control of underactuated AUV. *Computer Simulation*, 2010, **26**(10): 146–170
(付江锋, 严卫生, 赵涛. 欠驱动 AUV 的直线航迹跟踪控制. 计算机仿真, 2010, **26**(10): 146–170)
- 14 Shi Shu-Wei, Yan Wei-Sheng, Gao Jian, Li Wen-Bai. Path-following control of an AUV in the horizontal plane with constant ocean currents. *Acta Armamentarii*, 2010, **31**(3): 375–379
(施淑伟, 严卫生, 高剑, 李闻白. 常值海流作用下的 AUV 水平面路径跟踪控制. 兵工学报, 2010, **31**(3): 375–379)
- 15 Encarnacao P, Pascoal A. 3D path following for autonomous underwater vehicle. In: Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, Australia: IEEE, 2000. 2977–2982
- 16 Ding N, Li Z J, Yang C G, Ge T. Robust adaptive motion control for remotely operated vehicles with velocity constraints. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Tianjin, China: IEEE, 2010. 932–937
- 17 Micaelli A, Samson C. Trajectory Tracking for Unicycle-Type and Two-Steering-Wheels Mobile Robots, Technical Report PDP.CNS.2097, INRIA, Sophia Antipolis, France, 1993
- 18 Aicardi M, Casalino G, Bicchi A, Balestrino A. Closed loop steering of unicycle like vehicles via Lyapunov techniques. *IEEE Robotics and Automation Magazine* 1995, **2**(1): 27–35
- 19 Li Dian-Pu. *Ship Motion and Modeling (Second Edition)*. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 11
(李殿璞. 船舶运动与建模 (第二版). 北京: 国防工业出版社, 2008. 11)
- 20 Greiner W. *Classical Mechanics: Point Particles and Relativity*. New York: Springer, 2004. 72–86
- 21 Papoulias F A. Bifurcation analysis of line of sight vehicle guidance using sliding modes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1991, **1**(4): 849–865
- 22 Tang Li. Research on the Neural Network Adaptive Control for Autonomous Underwater Vehicle's Horizontal Tracking Problem [Master dissertation], Harbin Engineering University, China, 2009
(汤莉. AUV 神经网络水平面航迹跟踪控制研究 [硕士学位论文], 哈尔滨工程大学, 中国, 2009)
- 23 Fossen T I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002. 140–152
- 24 Wichlund K Y, Sordalen O J, Egeland O. Control properties of underactuated vehicles. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya, Japan: IEEE, 1995. 2009–2014
- 25 Bu R X, Liu Z J, He Q H. Path following of underactuated surface ships with uncertain forward speed. In: Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference. Yantai, China: IEEE, 2008. 4053–4058
- 贾鹤鸣 哈尔滨工程大学自动化学院博士. 主要研究方向为非线性系统控制, 无人水下航行器控制技术. 本文通信作者.
E-mail: jiaheminglucky99@126.com
(**JIA He-Ming** Ph.D. at the College of Automation, Harbin Engineering University. His research interest covers nonlinear system control and unmanned underwater vehicle control technology. Corresponding author of this paper.)
- 张利军 西北工业大学航海学院教授. 主要研究方向为非线性系统控制. E-mail: zhanglj@hrbeu.edu.cn
(**ZHANG Li-Jun** Professor at the School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University. His main research interest is nonlinear system control.)
- 程相勤 哈尔滨工程大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为无人水下航行器控制技术. E-mail: chengxianqin@hrbeu.edu.cn
(**CHENG Xiang-Qin** Ph.D. candidate at the College of Automation, Harbin Engineering University. His main research interest is unmanned underwater vehicle control technology.)
- 边信黔 哈尔滨工程大学自动化学院教授. 主要研究方向为船舶动力定位, 无人水下航行器控制. E-mail: bsa323@126.com
(**BIAN Xin-Qian** Professor at the College of Automation, Harbin Engineering University. His research interest covers ship dynamic positioning and unmanned underwater vehicle control.)
- 严浙平 哈尔滨工程大学自动化学院教授. 主要研究方向为无人水下航行器, 智能控制. E-mail: yanzheping@hrbeu.edu.cn
(**YAN Zhe-Ping** Professor at the College of Automation, Harbin Engineering University. His research interest covers motion control of unmanned underwater vehicle and intelligence control.)
- 周佳加 哈尔滨工程大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为无人水下航行器控制技术. E-mail: choujaa123@163.com
(**ZHOU Jia-Jia** Ph.D. candidate at the College of Automation, Harbin Engineering University. His main research interest is unmanned underwater vehicle control technology.)