

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.045

基于干扰观测器的 AUV 三维路径滑模跟踪控制

王庆楠^a, 王娜^{a, b}, 李广有^a, 尹庆华^a

(青岛大学 a. 自动化学院; b. 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 为了确保欠驱动自主式水下机器人(AUV)在受到外界干扰情况下仍然可以实现对三维路径的跟踪控制, 设计基于干扰观测器的反步滑模控制器。针对欠驱动 AUV 5 自由度状态方程, 考虑外界干扰对 AUV 运动的影响, 设计干扰观测器实时估计干扰; 通过欠驱动 AUV 的状态方程与三维路径跟踪误差模型得到系统的镇定模型; 利用得到的干扰估计值, 设计反步滑模复合控制器来控制 AUV 实现三维路径跟踪, 并通过 Lyapunov 稳定性理论证明闭环系统渐近稳定。仿真结果表明: 该控制器对欠驱动 AUV 实现三维路径的精确跟踪有良好的控制效果和抗干扰能力。

关键词: 欠驱动自主水下机器人; 三维路径跟踪; 干扰观测器; 反步滑模控制

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)03-0209-06

Sliding Model Tracking Control for AUV Three Dimensional Path Based on Disturbance Observer

WANG Qingnan^a, WANG Na^{a, b}, LI Guangyou^a, YIN Qinghua^a

(a. College of Automation; b. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to ensure that the underactuated autonomous underwater vehicle (AUV) can still track and control the 3D path in the case of external interference, a backstepping sliding mode controller based on disturbance observer is designed. According to the 5-DOF state equation of underactuated AUV, an interference observer is designed to estimate the interference in real time considering the influence of external interference on the motion of AUV. The stabilization model of the system is obtained through the state equation of the underactuated AUV and the 3D path tracking error model. A backstepping sliding mode composite controller is designed to control the AUV and realize the 3D path tracking. The closed-loop system is proved to be asymptotically stable by Lyapunov stability theory. The simulation results show that the controller has good control effect and anti-interference ability for the accurate tracking of 3D path of underactuated AUV.

Keywords: underactuated autonomous underwater vehicle; 3D path tracking; nonlinear disturbance observer; backstepping sliding mode control

0 引言

自主水下机器人(AUV)由于具有较高的机动性和系统可靠性, 在实现海洋科学调查、水下勘探和海洋目标探查中起到重要作用^[1]。AUV 的路径跟踪控制是实现以上任务的保障。但由于 AUV 在复杂的海下环境作业时易受风、浪等干扰的影响^[2], 因此提高 AUV 在路径跟踪过程中的抗干扰能力有重要意义。

近年来, AUV 的路径跟踪问题已引起学者们广泛关注。文献[3]针对 AUV 水平面模型, 基于视线导引法建立跟踪误差模型, 在控制器设计中结合模型预测算法, 提高了 AUV 在水平面轨迹跟踪的精度。文献[4]针对 AUV 水平面模型受到干

扰的情况, 设计了基于干扰观测器的滑模控制器, 补偿外界干扰带来的影响, 提高了 AUV 在水平面的跟踪性能。文献[5]对于欠驱动 AUV 受到干扰以及模型不确定性情况下的水平面路径跟踪问题, 设计了基于自适应反步控制算法与模糊控制算法结合的控制, 提高系统的抗干扰能力。针对 AUV 在垂直面的路径跟踪问题, 文献[6]将 Lyapunov 直接法与反步法结合设计控制器, 使 AUV 以期望的合成速度跟踪预定的深度路径。文献[7]设计了静态输出反馈控制器来提高 AUV 在垂直面的跟踪精度。上述文献只研究了 AUV 在水平面或垂直面的路径跟踪问题。文献[8]通过运用“虚拟向导”法建立三维路径跟踪误差模型, 采用滤波反步算法, 解决了 AUV 三维路径跟

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703221); 山东省自然科学基金项目(ZR2016FP10)

第一作者简介: 王庆楠(1997—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为水下机器人抗干扰容错控制, 895183279@qq.com。

踪控制问题。文献[9]使用反步法设计了具有非线性动态特性的控制器,并应用到欠驱动 AUV 的三维轨迹跟踪控制上,提高了 AUV 三维路径的跟踪性能。文献[10]针对欠驱动 AUV 6 自由度模型受到不确定性影响,在控制器设计中将对角回归神经网络与 S 面控制算法结合,提高了跟踪的精度。以上文献均未考虑 AUV 受到外界干扰情况下的三维路径跟踪问题。

本文针对欠驱动 AUV 5 自由度模型受到干扰影响下的三维路径跟踪问题,设计了基于干扰观测器的反步滑模控制器(DOBSMC),实现欠驱动 AUV 的三维路径跟踪控制。

1 欠驱动 AUV 数学模型

通过定义固定坐标系 $\{I\}:E-\xi\eta\zeta$ 和刚体坐标系 $\{B\}:O-xyz$ 来描述欠驱动 AUV 的运动,如图 1 所示。图中 θ 为纵摇角与 ψ 为艏摇角代表姿态向量。

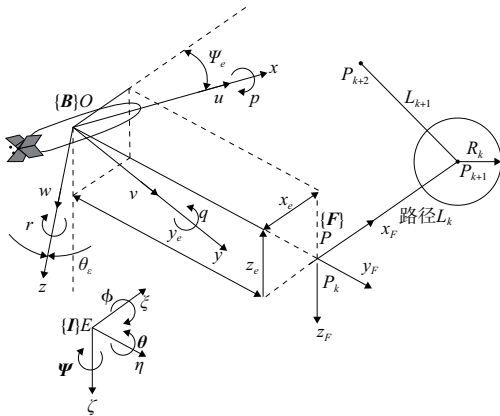


图 1 坐标系

忽略 AUV 的横滚运动,建立欠驱动 AUV 五自由度运动学及动力学模型^[11]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{B}}\mathbf{V} + \mathbf{C}(\mathbf{V})\mathbf{V} + \mathbf{D}(\mathbf{V})\mathbf{V} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d} \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{V} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{V} = [u \ v \ w \ q \ r]^T$ 为定义在坐标系 $\{B\}$ 中的速度向量和角速度向量,其中 u 为纵荡速度, v 为横荡速度, w 为垂荡速度, q 为纵摇角速度, r 为艏摇角速度; $\boldsymbol{\eta} = [\mathbf{x} \ \mathbf{y} \ \mathbf{z} \ \boldsymbol{\theta} \ \boldsymbol{\psi}]^T$ 是 AUV 定义在坐标系 $\{I\}$ 中的位置向量和姿态向量, $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$ 为 AUV 位置向量; $\mathbf{B}$ 代表质量及惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{V})$ 代表科氏向心力矩阵; $\mathbf{D}(\mathbf{V})$ 代表流体阻尼矩阵; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = [0 \ 0 \ 0 \ M_{HS} \ 0]^T$ 为重力和浮力产生的恢复力矩向量; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ 为坐标系 $\{I\}$ 与坐标系 $\{B\}$ 之间的转换矩阵; $\boldsymbol{\tau}$ 为 AUV 的驱动力和力矩; $\mathbf{d}$ 为 AUV 所

受到的外界干扰。将式(1)中的动力学模型展开可以得到:

$$\begin{cases} \dot{u} = F_u u + F_X X + d_u \\ \dot{v} = F_v v + d_v \\ \dot{w} = F_w w + d_w \\ \dot{q} = F_q q + F_M M_{HS} + F_M M + d_q \\ \dot{r} = F_r r + F_N N + d_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } F_u &= \frac{X_{u|u|}|u|}{m - X_{\dot{u}}}; F_X = \frac{1}{m - X_{\dot{u}}}; F_v = \frac{Y_{v|v|}|v|}{m - Y_{\dot{v}}}; \\ F_w &= \frac{Z_{w|w|}|w|}{m - Z_{\dot{w}}}; F_q = \frac{M_{q|q|}|q| + M_{uq}u}{I_{yy} - M_{\dot{q}}}; F_M = \frac{1}{I_{yy} - M_{\dot{q}}}; \\ M_{HS} &= -z_g G \sin \theta; F_r = \frac{N_{r|r|}|r| + N_{ur}u}{I_{zz} - N_{\dot{r}}}; F_N = \frac{1}{I_{zz} - N_{\dot{r}}}. \end{aligned}$$

其中 m 为 AUV 的质量; I_{yy} 和 I_{zz} 分别为 y 轴和 z 轴方向上的转动惯量; $X_{\dot{u}}, X_{u|u|}, Y_{\dot{v}}, Y_{v|v|}, Z_{\dot{w}}, Z_{w|w|}, M_{\dot{q}}, M_{q|q|}, M_{uq}, N_{\dot{r}}, N_{r|r|}, N_{ur}$ 为水动力系数; X, M, N 分别为轴向推力、纵摇控制力矩、艏摇控制力矩; d_u, d_v, d_w, d_q, d_r 为 AUV 所受到的环境干扰。

2 干扰观测器的设计

定义状态变量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$, 其中:

$$x_1 = u, x_2 = v, x_3 = w, x_4 = q, x_5 = r.$$

把状态方程(2)改写成向量形式:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{Q}_1(\mathbf{x})M_{HS} + \mathbf{Q}_2(\mathbf{x})M + \mathbf{Q}_3(\mathbf{x})N + \mathbf{Q}_4\mathbf{d} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= [F_u x_1 \ F_v x_2 \ F_w x_3 \ F_q x_4 \ F_r x_5]^T; \\ \mathbf{Q}_1(\mathbf{x}) &= \mathbf{Q}_2(\mathbf{x}) = [0 \ 0 \ 0 \ F_M \ 0]^T; \mathbf{Q}_3(\mathbf{x}) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ F_N]^T; \mathbf{Q}_4(\mathbf{x}) = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5]^T; \mathbf{d} = [d_u \ d_v \ d_w \ d_q \ d_r]^T, \\ d_1 &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T; d_2 = d_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, d_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T, d_5 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T. \end{aligned}$$

构造干扰观测器如下:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{d}} = \mathbf{z} + \mathbf{T}(\mathbf{x}) \\ \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{L}[-\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{Q}_4(\mathbf{z} + \mathbf{T}(\mathbf{x}))] - [\mathbf{L}\mathbf{Q}_1(\mathbf{x})M_{HS} - \mathbf{L}\mathbf{Q}_2M - \mathbf{L}\mathbf{Q}_3N] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{d}}$ 是 $\mathbf{d}$ 的估计值; $\mathbf{T}(\mathbf{x}) = T_1 x_1 + T_2 x_2 + T_3 x_3 + T_4 x_4 + T_5 x_5$, 其中 T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 均为大于 0 的常数; $\mathbf{z}$ 是观测器的辅助变量; $\mathbf{L} = \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5]$ 为观测器的增益矩阵。

定义观测误差:

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (5)$$

假设 AUV 所受干扰 d 是慢时变的,有 $\dot{d} \approx 0$, 可以得到:

$$\dot{\tilde{d}} = \dot{d} - \dot{\hat{d}} = -LQ_4 \tilde{d} \quad (6)$$

$$\text{取 Lyapunov 函数: } V_{\text{obs}} = \frac{1}{2} \tilde{d}^2 \quad (7)$$

对 V_{obs} 求导,有

$\dot{V}_{\text{obs}} = \tilde{d} \dot{\tilde{d}} = -LQ_4 \tilde{d}^2 \leq 0$, 因此干扰估计误差最终可以收敛到 0。

3 DOBSMC 设计

3.1 三维路径跟踪误差模型

首先将当前路径的起点 $P_k(\xi_k, \eta_k, \zeta_k)$ 作为原点定义新的坐标系 $\{F\}$: $P-x_F y_F z_F$, 纵轴 x_F 与路径重合并且指向下一个路径点 $P_{k+1} = (\xi_{k+1}, \eta_{k+1}, \zeta_{k+1})$ 。将 $\{I\}$ 分别绕 ζ 轴和 η 轴旋转 ψ_F 和 θ_F 角, 然后平移至 P_k , 就可以得到新的坐标系 $\{F\}$ 。

$$\begin{cases} \theta_F = -\arctan2(\Delta\xi, \sqrt{\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2}) \\ \psi_F = -\arctan(\Delta\eta, \Delta\xi) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta\xi = \xi_{k+1} - \xi_k$; $\Delta\eta = \eta_{k+1} - \eta_k$; $\Delta\zeta = \zeta_{k+1} - \zeta_k$ 。

基于参考文献[12]得到跟踪误差模型: 定义 $P_0 = [\xi_0 \ \eta_0 \ \zeta_0 \ \theta \ \psi]$ 是 O 在坐标系 $\{I\}$ 的位置和姿态, $P_p = [\xi_k \ \eta_k \ \zeta_k \ \theta_F \ \psi_F]$ 是 P 在坐标系 $\{I\}$ 的位置和姿态。在坐标系 $\{F\}$ 中的跟踪误差为:

$$P_e = [x_e \ y_e \ z_e \ \theta_e \ \psi_e] = R(P_0 - P_p)$$

式中 R 是坐标系 $\{I\}$ 到坐标系 $\{F\}$ 的转换矩阵,

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & R_2 \end{bmatrix};$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos\psi_F \cos\theta_F & \sin\psi_F \cos\theta_F & -\sin\theta_F \\ -\sin\psi_F & \cos\psi_F & 0 \\ \cos\psi_F \sin\theta_F & \sin\psi_F \sin\theta_F & \cos\theta_F \end{bmatrix};$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos\theta \end{bmatrix}。$$

对跟踪误差 P_e 求导有:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u \cos\psi_e \cos\theta_e - v \sin\psi_e + w \cos\psi_e \sin\theta_e \\ \dot{y}_e = u \sin\psi_e \cos\theta_e - v \cos\psi_e + w \sin\psi_e \sin\theta_e \\ \dot{z}_e = -u \sin\theta_e - v \cos\theta_e \\ \dot{\theta}_e = q \\ \dot{\psi}_e = \dot{\psi} \cos\theta_F = \frac{r \cos\theta_F}{\cos\theta} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 三维路径跟踪控制器设计

因 AUV 无垂向力与横向力,故 v 与 w 很小,可忽略不计。又由于 x_e 不需要进行控制,所以结合式(2)和式(9)得到以下欠驱动 AUV 镇定模型^[13]:

$$\begin{cases} \dot{y}_e = u \sin\psi_e \cos\theta_e \\ \dot{z}_e = -u \sin\theta_e \\ \dot{\theta}_e = q \\ \dot{\psi}_e = r \cos\theta_F / \cos\theta \\ u_e = u_d - u \\ \dot{q} = F_q q + F_M M_{\text{HS}} + F_M M + d_q \\ \dot{r} = F_r r + F_N N + d_r \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_d 为期望纵荡速度; u_e 为纵荡速度误差。

取 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} (y_e^2 + z_e^2) \quad (11)$$

对 V_1 求导有

$$\dot{V}_1 = y_e \dot{y}_e + z_e \dot{z}_e = y_e u \sin\psi_e \cos\theta_e - z_e u \sin\theta_e$$

设计艏摇角误差期望值 ψ_{ed} 和纵摇角误差期望值 θ_{ed} 为

$$\begin{cases} \psi_{\text{ed}} = -\tan^{-1}(k_1 y_e) \\ \theta_{\text{ed}} = \tan^{-1}(k_2 z_e) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $k_1 > 0$; $k_2 > 0$ 。

令 $\psi_e = \psi_{\text{ed}}$, $\theta_e = \theta_{\text{ed}}$, 可得

$$\dot{V}_1 = \frac{uk_1 \cos\theta_e}{\sqrt{1+(k_1 y_e)^2}} y_e^2 - \frac{uk_2}{\sqrt{1+(k_2 z_e)^2}} z_e^2 \leq 0$$

取 Lyapunov 函数

$$V_2 = \frac{1}{2} (\tilde{\psi}_e^2 + \tilde{\theta}_e^2) \quad (13)$$

对 V_2 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \tilde{\psi}_e \left\{ \frac{uk_1^2 \cos\theta_e y_e}{[1+(k_1 y_e)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{\cos\theta_F}{\cos\theta} r \right\} - \\ \tilde{\theta}_e \left\{ \frac{uk_2^2 z_e}{[1+(k_2 z_e)^2]^{\frac{3}{2}}} + q \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

要使系统稳定收敛,即满足 $\dot{V}_2 < 0$, 因此设计艏摇角速度期望值 r_d 和纵摇角速度期望值 q_d :

$$\begin{cases} r_d = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_F} \left\{ \frac{uk_1^2 \cos\theta_e y_e}{[1+(k_1 y_e)^2]^{\frac{3}{2}}} + k_3 \tilde{\psi}_e \right\} \\ q_d = -\frac{uk_2^2 z_e}{[1+(k_2 z_e)^2]^{\frac{3}{2}}} + k_4 \tilde{\theta} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $k_3 > 0; k_4 > 0$ 。

定义误差变量: $\tilde{r} = r_d - r, \tilde{q} = q_d - q$ 可得:

$$V_2 = -k_3 \tilde{\psi}_e - k_4 \tilde{\theta}_e + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e \tilde{r} + \tilde{\theta}_e \tilde{q} \quad (16)$$

取滑模函数:

$$\begin{cases} s_1 = u_e + c_1 \int_0^t u_e d\tau \\ s_2 = \tilde{r} + c_2 \tilde{\psi}_e \\ s_3 = \tilde{q} + c_3 \tilde{\theta}_e \end{cases} \quad (17)$$

式中: $c_1 > 0; c_2 > 0; c_3 > 0$ 。

取 Lyapunov 函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2} s_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}_u^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}_q^2 + \frac{1}{2} \tilde{d}_r^2 \quad (18)$$

对 V_3 求导有

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 + s_3 \dot{s}_3 + \tilde{d}_u \dot{\tilde{d}}_u + \tilde{d}_q \dot{\tilde{d}}_q + \tilde{d}_r \dot{\tilde{d}}_r + \\ \dot{\tilde{d}}_q \dot{\tilde{d}}_q &= -k_3 \tilde{\psi}_e^2 - k_4 \tilde{\theta}_e^2 + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e (s_2 - c_2 \tilde{\psi}_e) + \\ &\tilde{\theta}_e (s_3 - c_3 \tilde{\theta}_e) + s_1 (-F_u u - F_x X - d_u + c_1 u_e) + \\ s_2 (\dot{r}_d - F_r r - F_N N - d_r + c_2 \tilde{\psi}_e) + \\ s_3 (\dot{q}_d - F_q q - F_M M_{HS} - F_M M - d_q + c_3 \tilde{\theta}_e) - \\ \tilde{d}_u \dot{\tilde{d}}_u - \tilde{d}_r \dot{\tilde{d}}_r - \tilde{d}_q \dot{\tilde{d}}_q &= -k_3 \tilde{\psi}_e^2 - k_4 \tilde{\theta}_e^2 - \\ c_2 \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e^2 - c_3 \tilde{\theta}_e^2 + s_1 (-F_u u - F_x X - \hat{d}_u + c_1 u_e) + \\ s_2 (\dot{r}_d - F_r r - F_N N - \hat{d}_r + c_2 \tilde{\psi}_e) + \\ s_3 (\dot{q}_d - F_q q - F_M M_{HS} - F_M M - \hat{d}_q + c_3 \tilde{\theta}_e) - \\ s_1 \tilde{d}_u - s_2 \tilde{d}_r - s_3 \tilde{d}_q - \tilde{d}_u \dot{\tilde{d}}_u - \tilde{d}_r \dot{\tilde{d}}_r - \tilde{d}_q \dot{\tilde{d}}_q \end{aligned} \quad (19)$$

设计控制器为:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{F_X} [-F_u \hat{d}_{1u} + c_1 u_e + k_6 s_1 + \varepsilon_1 \text{sig}(s_1)] \\ N = \frac{1}{F_N} [\dot{r}_d - F_r r - \hat{d}_{1r} - \hat{d}_{2r} + c_2 \tilde{\psi}_e + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e + \\ k_7 s_2 + \varepsilon_2 \text{sig}(s_2)] \\ M = \frac{1}{F_M} [\dot{q}_d - F_q q - F_M M_{HS} - \hat{d}_{1q} - \hat{d}_{2q} + c_3 \tilde{\theta}_e + \\ \tilde{\theta}_e + k_8 s_3 + \varepsilon_3 \text{sig}(s_3)] \\ \text{sig}(s_i) = \frac{1 - e^{-k_5 s_i}}{1 + e^{-k_5 s_i}}, \quad i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (20)$$

式中 $k_5, k_6, k_7, k_8, s_1, s_2, s_3$ 均大于 0。

根据干扰观测器设计部分推导, 干扰估计误差可以收敛到 0, 所以可以得到:

$\tilde{d}_u \approx 0, \tilde{d}_q \approx 0, \tilde{d}_r \approx 0$, 并且有

$$-\tilde{d}_u \dot{\tilde{d}}_u - \tilde{d}_r \dot{\tilde{d}}_r - \tilde{d}_q \dot{\tilde{d}}_q = -T_1 \tilde{d}_u^2 - T_4 \tilde{d}_2^2 - T_5 \tilde{d}_q^2 \quad (21)$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -\left(k_3 + c_2 \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta}\right) \tilde{\psi}_e^2 - (k_4 + c_3 \tilde{\theta}_e^2) - k_6 s_1^2 - \\ k_7 s_2^2 - k_8 s_3^2 - T_1 \tilde{d}_u^2 - T_4 \tilde{d}_r^2 - T_5 \tilde{d}_q^2 - \\ \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i |s_i| \left| \frac{1 - e^{-k_5 s_i}}{1 + e^{-k_5 s_i}} \right| &\leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

4 仿真实验

为验证本文所提出控制器的有效性, 在 Matlab2019a Simulink 中基于文献[14]中 AUV 模型进行数值仿真, 具体参数如下:

$m = 30.48 \text{ kg}, X_u = -0.93 \text{ kg}, X_{u|u|} = -1.62 \text{ kg/m},$
 $Y_v = -35.5 \text{ kg}, Y_{v|v|} = -1310 \text{ kg/m}, Z_w = -35.5 \text{ kg},$
 $Z_{w|w|} = -1310 \text{ kg/m}, M_{q|q|} = 3.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2,$
 $M_{uq} = -2 \text{ kg} \cdot \text{m/rad}, I_{yy} = 3.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, M_q = -4.88$
 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}, z_g = -0.598 \text{ kg}, N_{ur} = -2 \text{ kg} \cdot \text{m/rad}, g =$
 $9.81 \text{ m/s}^2, N_{r|rl} = -9.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}^2, I_{zz} = 3.45$
 $\text{kg} \cdot \text{m}^2, N_r = -4.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{rad}.$

干扰观测器参数选取为: $T_1 = 1, T_2 = 0, T_3 = 0,$
 $T_4 = 1, T_5 = 1$ 。

期望纵荡速度 u_d 为 1 m/s 。

控制器参数选取为:

$k_1 = 0.2, k_2 = 0.1, k_3 = 1.0, k_4 = 1.0, k_5 = 10, c_1 =$
 $0.1, c_2 = 0.1, c_3 = 0.1, k_6 = 1.0, k_7 = 1.0, k_8 = 10, \varepsilon_1 =$
 $0.1, \varepsilon_2 = 0.1, \varepsilon_3 = 0.1$ 。

初始位姿向量: $P_0 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.5\pi)^T$ 。

所受外界干扰为: $d_u = 25, d_v = d_w = 0, d_q =$
 $10\sin(0.1t), d_r = 5\sin(0.25t) + 10$ 。

图 2 是采用传统反步滑模控制器(BSMC)与本文所设计的 DOBSMC 作用下的欠驱动 AUV 跟踪路径与期望路径的对比图。图 3 和图 4 是 AUV 三维路径分别在水平面投影与垂直面投影的跟踪效果对比。当要求 AUV 实现三维路径跟踪任务时, 跟踪路径与期望路径越相近, 说明跟踪效果越好。从图中明显可以看出, BSMC 的跟踪路径与期望路径的偏差较大, 而采用 DOBSMC 的跟踪效果较好。图 5 是 DOBSMC 作用下的 y 方向与 z 方向上的跟踪误差。从图中可以看出误差分别在 $25 \text{ s}, 15 \text{ s}$ 左右时达到了峰值 $0.075 \text{ m}, 0.055 \text{ m}$, 之后误差均稳定在 0.05 m 范围内。

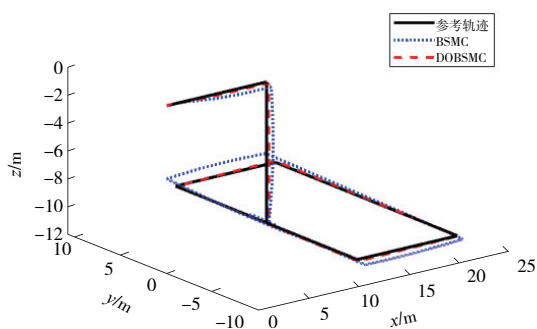


图2 AUV 三维路径跟踪效果对比

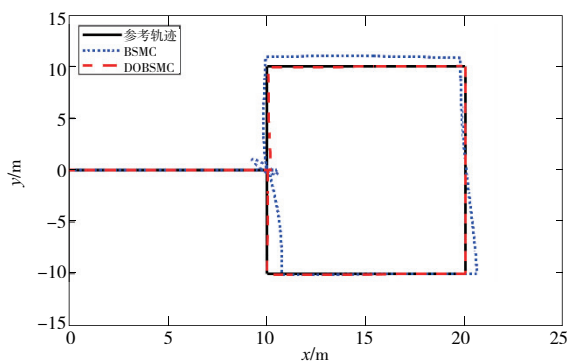


图3 AUV 水平面投影跟踪效果对比

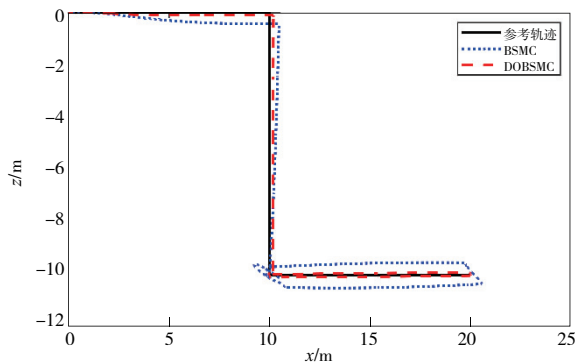


图4 AUV 垂直面投影跟踪效果对比

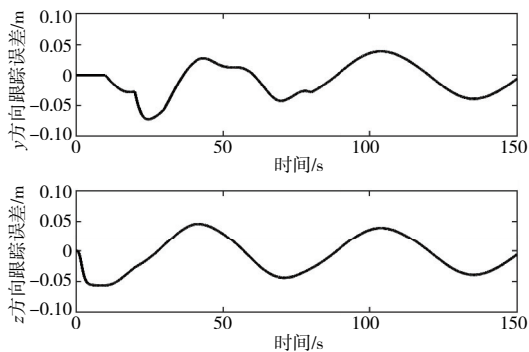


图5 跟踪误差曲线

图6为干扰实际值与干扰观测器得到的估计值对比曲线。由图可知,干扰观测器可以实现对外界干扰的估计。

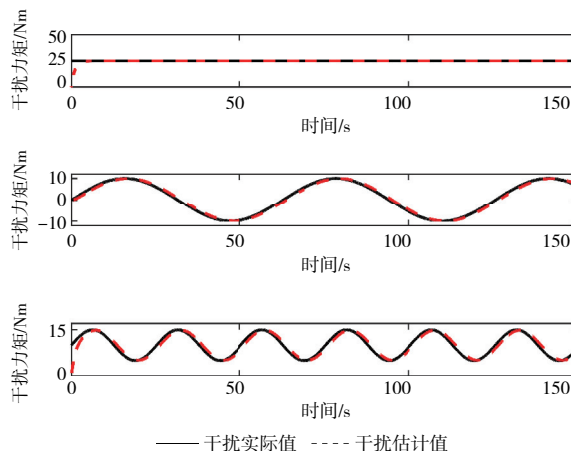


图6 干扰实际值与估计值对比曲线

图7是轴向推力 X 、纵摇控制力矩 M 以及艏摇控制力矩 N 的响应曲线。

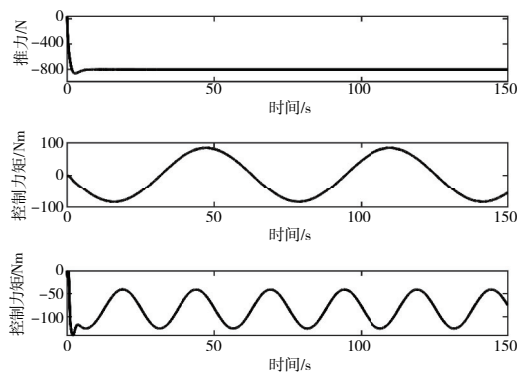


图7 控制器响应曲线

图8是纵荡速度 u 的响应曲线,通过对式(2)的分析,纵荡速度只与轴向推力 X 有关,轴向推力 X 直接决定了纵荡速度 u 的大小。仿真结果显示,当轴向推力 X 稳定在800 N后,在其控制下纵荡速度 u 最终收敛到期望值1 m/s。

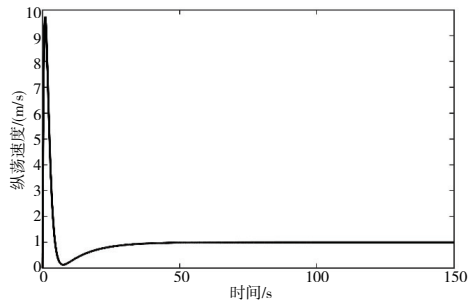


图8 纵荡速度响应曲线

5 结语

通过对欠驱动 AUV 的 5 自由度模型与跟踪误差模型的简化得到系统镇定模型,考虑 AUV 受到干扰影响,设计了 DOBSMC。仿真得到了 AUV 跟踪的效果对比曲线以及位置跟踪误差曲线、干扰估计曲线、控制力矩和纵荡速度的响应曲线。结果表明该控制器能够提高 AUV 三维路径的跟踪精度,且能有效抑制外界干扰对系统性能造成的影响。

参考文献:

- [1] 王鹏. 欠驱动自主水下航行器的航迹跟踪控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021.
- [2] 王芳,万磊,李晔,等. 欠驱动 AUV 的运动控制技术综述[J]. 中国造船,2010,51(2):227-241.
- [3] 郭亦平,王益民,任元洲. 基于视线导引法的 AUV 轨迹跟踪控制技术研究[J]. 声学及电子工程,2018(4):32-36,40.
- [4] 李广有,王娜,尹庆华. 欠驱动 AUV 基于干扰观测器的滑模控制[J]. 机械制造与自动化,2022,51(2):177-180.
- [5] 王金强,王聪,魏英杰,等. 未知海流干扰下自主水下航行器位置跟踪控制策略研究[J]. 兵工学报,2019,40(3):588-591.
- [6] YU C Y, XIANG X B. Vertical plane path following control of an under-actuated autonomous underwater vehicle[C]//2016 IEEE International Conference on

Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). Penang, Malaysia: IEEE, 2017: 37-41.

- [7] SUBUDHI B, MUKHERJEE K, GHOSH S. A static output feedback control design for path following of autonomous underwater vehicle in vertical plane[J]. Ocean Engineering, 2013, 63: 72-76.
- [8] 王宏健,陈子印,贾鹤鸣,等. 基于滤波反步法的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制[J]. 自动化学报,2015,41(3):631-645.
- [9] LI Y, WEI C, WU Q, et al. Study of 3 dimension trajectory tracking of underactuated autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2015, 105: 270-274.
- [10] 周则兴. 基于 DRNN-S 控制的 AUV 三维轨迹跟踪方法[J]. 舰船科学技术,2021,43(21):96-99,178.
- [11] 金鸿章,姚绪梁. 船舶控制原理[M]. 2 版. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013.
- [12] 姚绪梁,王晓伟,蒋晓刚,等. 海流干扰下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2019,51(3):37-45.
- [13] 王晓伟,姚绪梁,夏志平,等. 欠驱动 AUV 三维直线路径跟踪控制[J]. 控制工程,2020,27(6):977-983.
- [14] PRESTERO T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle[D]. [S.I.]: Massachusetts Institute of Technology, 2001.

收稿日期:2022-10-25

(上接第 198 页)

- [4] 田海波,马宏伟,马琨,等. 一种三构态变胞并联机构运动学及工作空间分析[J]. 机器人,2019,41(3):414-424.
- [5] 叶鹏达,尤晶晶,仇鑫,等. 并联机器人运动性能的研究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(3):363-377.
- [6] GOSSELIN C, ANGELES J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 281-290.
- [7] HAO F, MCCARTHY JM. Conditions for line-based singularities in spatial platform manipulators[J]. Journal of Robotic Systems, 1998, 15(1): 43-55.
- [8] MERLET J P. Parallel Robots[M]. [S.I.]: Springer Press, 2016: 30-31.

- [9] COLLINS C L, MCCARTHY J M. The quartic singularity surfaces of planar platforms in the Clifford algebra of the projective plane[J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(7): 931-944.
- [10] 李虹,刘小娟,李瑞琴. 3-RRP 平面并联机构的动力学性能研究[J]. 机械设计与制造, 2018(7): 123-126.
- [11] 仇鑫,尤晶晶,叶鹏达,等. 一种可重构 Stewart 型并联机器人的静刚度分析[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2022, 45(3): 132-140.
- [12] 孙占朋,王亮. 空间机器人运行中回避奇异问题路径规划[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 287-291, 354.

收稿日期:2022-10-11