

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201709002

海流干扰下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制

姚绪梁¹, 王晓伟^{1,2}, 蒋晓刚², 王 峰¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 九江职业技术学院 机械工程学院, 江西 九江 332007)

摘 要:为解决存在海流干扰和模型不确定性情况下欠驱动自主水下航行器(AUV)的三维路径跟踪控制问题,首先在 Serret-Frenet 坐标系下,基于虚拟向导建立了跟踪误差模型.然后,在运动学控制器中基于李雅普诺夫(Lyapunov)理论和反步法设计具有自适应律的虚拟向导和一种改进的积分视线法(ILOS)导引律,克服了海流的干扰并减少了超调.应用反步自适应滑模控制(BASMC)理论设计动力学控制器,保证了系统的稳定性和鲁棒性.最后,应用非线性级联理论证明了整个控制系统的闭环稳定性.仿真结果表明:基于 AUV 与流体的相对速度来实现的控制律,便于工程应用.该控制器能够有效克服海流和模型不确定的影响,实现对三维路径的跟踪.

关键词: 自主水下航行器; 路径跟踪; 滑模控制; Serret-Frenet 坐标系; 积分视线法

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)03-0037-09

Control for 3D path-following of underactuated autonomous underwater vehicle under current disturbance

YAO Xuliang¹, WANG Xiaowei^{1,2}, JIANG Xiaogang², WANG Feng¹

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Mechanical Engineering, Jiujiang Vocational and Technical College, Jiujiang 332007, Jiangxi, China)

Abstract: To deal with the 3D path-following control problem of underactuated autonomous underwater vehicle (AUV) in the presence of current disturbance and model uncertainty, a tracking error model on the basis of virtual target in Serret-Frenet frame was established. Based on the Lyapunov theory and back-stepping method in kinematic controller, the virtual target with adaptive law and an improved integral line-of-sight (ILOS) guidance law were then developed, which can overcome the interference of current and reduce overshoot. Dynamic controller was designed based on the back-stepping adaptive sliding mode control (BASMC) theory, which guarantees the stability and robustness of the system. Finally, the closed loop stability of the system was demonstrated by the nonlinear cascade system theory. The simulation results demonstrate that the control law, which is implemented based on the relative velocity between AUV and fluid, is convenient for engineering application, and the controller can effectively overcome the influence of current and model uncertainty and realize 3D path-following.

Keywords: AUV; path-following; sliding mode control; Serret-Frenet frame; ILOS

自主水下航行器(AUV)在民用和军事等众多领域都具有很高的实用价值.由于AUV对路径和轨迹的精确跟踪能力是其完成各种作业任务和避障的关键技术,所以AUV的路径和轨迹跟踪控制问题一直是研究的热点.但是,目前仍存在一些困难使得AUV控制器的设计变得非常棘手^[1].例如,出于节能和提高可靠性等方面的考虑,大部分AUV都被设计为欠驱动的形式,一般只配置推进器、方向舵和水平舵,缺少横向和垂向的驱动,从而在横向和垂向运动受到限制.另外,AUV的工作环境中存在海浪、海流等干扰以及AUV六自由度运动存在非线性和耦合性、水动力参数存在不确定性,导致AUV的运动

模型很难精确建模.

AUV的路径和轨迹跟踪控制一般分为运动学和动力学两个层面.文献[2-3]分别基于视线法(LOS)和向量场法(VF)导引律,设计了欠驱动船舶的路径跟踪控制器.文献[4]通过引入了趋近角和虚拟向导建立跟踪误差方程,然后基于李雅普诺夫(Lyapunov)理论和反步法设计了水平面路径跟踪控制器.但是当存在海流等干扰时,基于传统的LOS和VF导引律的路径跟踪会产生稳态误差.为了解决这个问题,文献[5]提出了一种积分视线法(ILOS)导引律,并得到了广泛的应用.针对欠驱动AUV的路径跟踪动力学控制器的设计,也有大量的研究.文献[6]应用ILOS导引律和PID控制器实现了海流干扰下欠驱动AUV的水平面路径跟踪控制.文献[7]采用反馈线性化方法设计了水平面路径跟踪控制器.针对AUV的垂直面路径跟踪问题,文献

收稿日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51279039)

作者简介: 姚绪梁(1969—)男,教授,博士生导师

通信作者: 王晓伟, wangxiaowei@hrbeu.edu.cn

[8] 采取解耦方式,分别采用 S 面控制方法和反步法设计了航速控制器和深度控制器. 为了提高系统的鲁棒性,文献[9-10]分别针对水平面和垂直面路径跟踪设计了自适应控制器和滑模控制器. 以上文献只是考虑了 AUV 在水平面或垂直面的路径跟踪问题. 文献[11]应用线性稳定理论和反步法设计了欠驱动 AUV 的三维轨迹跟踪控制器,但未考虑参数的不确定性. 文献[12]针对欠驱动 AUV 三维路径跟踪设计了鲁棒自适应控制器. 文献[13]采用滤波反步法设计了三维路径跟踪控制器. 但以上三维路径跟踪控制器都未考虑海流的影响. 文献[14]针对欠驱动 AUV 模型不确定性和海流干扰,将三维路径跟踪分解为水平面和垂直面跟踪控制问题,设计了航向和纵倾鲁棒控制器,但仅实现了对三维直线路径的跟踪控制.

本文针对存在海流干扰和模型不确定性情况下欠驱动 AUV 的三维路径跟踪控制问题,基于 Serret-Frenet 坐标系引入了虚拟向导并建立了三维路径跟踪误差模型. 设计了具有自适应律的虚拟向导并提出了一种改进的积分视线法(ILOS)导引律. 基于反步自适应滑模控制(BASMC)理论和 AUV 与流体的相对速度设计动力学控制器,并应用 sigmoid 函数设

$$J_1(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix},$$

$$J_2(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi / \cos \theta & \cos \varphi / \cos \theta \end{bmatrix};$$

$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_c^B = [u_r \ v_r \ w_r \ p \ q \ r]^T$ 为 AUV 与流体的相对速度,其中 u_r, v_r, w_r 分别为纵向、横向和垂向相对速度;AUV 的绝对速度定义为 $\mathbf{v}_B = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$,其中 u, v, w 分别为纵向、横向和垂向绝对速度, p, q, r 分别为横摇、纵摇和艏摇角速度; $\mathbf{v}_c^B = [u_c \ v_c \ w_c \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 为海流在 $\{B\}$ 中的速度分量; $[u_c \ v_c \ w_c]^T = J_1^T(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}_c^I$,其中 $\mathbf{v}_c^I = [v_\xi \ v_\eta \ v_\zeta]^T$ 为海流在 $\{I\}$ 中的速度分量,假设海流是无旋的且满足 $v_\xi^2 + v_\eta^2 + v_\zeta^2 < V_{\max}^2$; $\mathbf{M}, \mathbf{C}(\mathbf{v}_r), \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$ 分别为质量矩阵、哥氏力矩阵和阻尼矩阵; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = [0 \ 0 \ 0 \ K_{HS} \ M_{HS} \ 0]^T$ 为重力和浮力产生的恢复力矩,本文研究的 AUV 的重心位于浮心正下方,在横摇和纵摇两个自由度存在恢复力矩分别为 $K_{HS} = -z_g G \cos \theta \sin \phi, M_{HS} = -z_g G \sin \theta$,其中 z_g, G 分别为 AUV 的稳心高和重力; $\boldsymbol{\tau} = [X_\tau \ 0 \ 0 \ 0 \ M_\tau \ N_\tau]^T$ 为控制力和力矩,其中 X_τ, M_τ, N_τ 分别为螺旋桨、水平舵和方向舵产生的推力、纵倾力矩和艏摇力矩; $\mathbf{d}$ 为模型不确定性.

为了便于动力学控制器的设计,可以将动力学模型(2)展开为如下微分方程组的形式:

计滑模项,保证了系统的稳定性和鲁棒性、有效地削弱了抖振,而且更便于工程应用. 仿真结果验证了该控制器的有效性.

1 AUV 六自由度运动方程

本文研究的欠驱动 AUV 浮力与重力配置相等,尾部装有一个螺旋桨、一对水平舵、一对方向舵分别用来控制航速、纵倾和航向. AUV 的运动及受力分析需要用到两种坐标系,分别是运动坐标系 $\{B\}; O-xyz$ 和固定坐标系 $\{I\}; E-\xi\eta\zeta$. 本文将运动坐标系的原点 O 选取在 AUV 的浮心处,各坐标轴均符合右手系. AUV 在六自由度上受到的力和力矩如图 1 所示,所有符号均采用国际拖拽水池会议(ITTC)所推荐的符号. AUV 的运动学和动力学模型可以分别简化为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v}_r + [v_\xi \ v_\eta \ v_\zeta \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}. \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\eta} = [\xi \ \eta \ \zeta \ \phi \ \theta \ \psi]^T$,其中 ξ, η, ζ 为 AUV 在固定坐标系中的坐标, ϕ, θ, ψ 分别为横摇角、纵摇角和艏摇角; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ 为 $\{B\}$ 到 $\{I\}$ 的旋转变换矩阵,即

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} \dot{u}_r = F_u u_r + F_X X_\tau + d_u, \\ \dot{v}_r = F_v v_r + d_v, \\ \dot{w}_r = F_w w_r + d_w, \\ \dot{p} = F_p p + d_p, \\ \dot{q} = F_q q + F_M M_{HS} + F_M M_\tau + d_q, \\ \dot{r} = F_r r + F_N N_\tau + d_r. \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$F_u = \frac{X_u |u| |u_r|}{m - X_u}, F_X = \frac{1}{m - X_u}, F_v = \frac{Y_v |v| |v_r|}{m - Y_v},$$

$$F_w = \frac{Z_w |w| |w_r|}{m - Z_w}, F_p = \frac{K_p |p| |p|}{I_{xx} - K_p},$$

$$F_q = \frac{M_q |q| |q| + M_{uq} u_r}{I_{yy} - M_q}, F_M = \frac{1}{I_{yy} - M_q},$$

$$F_r = \frac{N_r |r| |r| + N_{ur} u_r}{I_{zz} - N_r}, F_N = \frac{1}{I_{zz} - N_r},$$

m 为 AUV 的质量, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 为 AUV 的惯性矩, $X_{|\cdot|}, Y_{|\cdot|}, Z_{|\cdot|}, K_{|\cdot|}, M_{|\cdot|}, N_{|\cdot|}$ 为水动力系数, $F_{|\cdot|}$ 采用名义值,模型不确定性包含在 $d_{|\cdot|}$ 中.

2 三维路径跟踪运动学误差模型

欠驱动 AUV 三维路径跟踪原理见图 1~3,为了

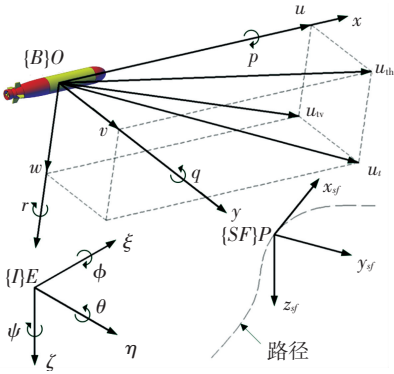


图1 三维路径跟踪示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D path-following

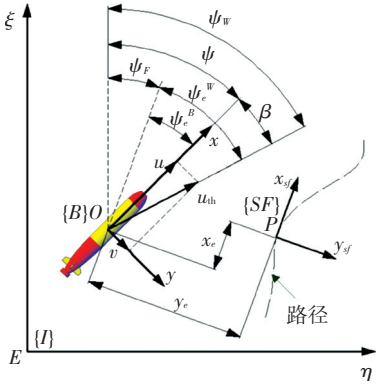


图2 水平面路径跟踪示意图

Fig.2 Horizontal plane of path-following

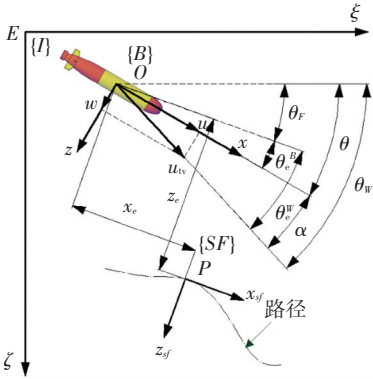


图3 垂直面路径跟踪示意图

Fig.3 Vertical plane of path-following

建立跟踪误差模型引入了 $\{SF\}$: P - $x_{sf}y_{sf}z_{sf}$ 坐标系, $\{SF\}$ 坐标系的原点 P 即为期望路径上被 AUV 跟踪的虚拟向导. 定义 c_c 、 c_t 分别为路径的曲率和挠率, 从路径起点开始沿路径的广义弧长为 s , 虚拟向导的速度为 u_F , $\{SF\}$ 坐标系的纵摇和艏摇角速度分别为 q_F 、 r_F , 则 $\dot{s} = u_F$, $q_F = c_t u_F$, $r_F = c_c u_F$. 定义 $\mathbf{v}_{SF} = [u_F \ q_F \ r_F]^T$, 忽略横摇的影响, 定义 P 在 $\{I\}$ 中的坐标为 $\mathbf{P}_P = [\xi_P \ \eta_P \ \zeta_P \ \theta_F \ \psi_F]^T$, 则 $\dot{\mathbf{P}}_P = \mathbf{R}_F^T \mathbf{v}_{SF}$, 其中 $\mathbf{R}_F^T$ 为 $\{SF\}$ 坐标系到 $\{I\}$ 坐标系的旋转变换矩阵为

$$\mathbf{R}_F^T = \begin{bmatrix} \cos \psi_F \cos \theta_F & 0 & 0 \\ \sin \psi_F \cos \theta_F & 0 & 0 \\ -\sin \theta_F & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\cos \theta_F \end{bmatrix}.$$

为了便于跟踪误差模型的推导, 以 AUV 的合成速度 u_i 为纵轴定义 $\{W\}$ 坐标系, 由 $\{B\}$ 坐标系沿 y 轴旋转 α 再沿 z 轴旋转 β , 即为 $\{W\}$ 坐标系. 忽略横摇的影响, 基于 $\{W\}$ 定义 $\mathbf{P}_O = [\xi_O \ \eta_O \ \zeta_O \ \theta_W \ \psi_W]^T$ 为 O 在 $\{I\}$ 中的位置和姿态, 其中 $\theta_W = \theta + \alpha$, $\psi_W = \psi + \beta$, α 、 β 分别为攻角和漂角, $\alpha = -\tan^{-1}(w/u)$, $\beta = \tan^{-1}(v/u)$. 定义在 $\{SF\}$ 中的跟踪误差为 $\mathbf{P}_e = [x_e \ y_e \ z_e \ \theta_e^W \ \psi_e^W]^T = \mathbf{R}_I^F (\mathbf{P}_O - \mathbf{P}_P)$, 其中 $\mathbf{R}_I^F$ 是从 $\{I\}$ 到 $\{SF\}$ 的旋转变换矩阵, 即

$$\mathbf{R}_I^F = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{R}_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \psi_F \cos \theta_F & \sin \psi_F \cos \theta_F & -\sin \theta_F \\ -\sin \psi_F & \cos \psi_F & 0 \\ \cos \psi_F \sin \theta_F & \sin \psi_F \sin \theta_F & \cos \theta_F \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \theta_F \end{bmatrix}.$$

矩阵 $\mathbf{R}_1$ 和 $\mathbf{R}_2$ 具有以下性质:

$$\dot{\mathbf{R}}_1 = \mathbf{S}_1 \mathbf{R}_1, \quad \dot{\mathbf{R}}_2 = \mathbf{S}_2 \mathbf{R}_2, \quad \chi^T \mathbf{S}_i \chi = 0, \quad \chi \in \mathbf{R}^3,$$

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 0 & r_F & -q_F \\ -r_F & 0 & -r_F \tan \theta_F \\ q_F & r_F \tan \theta_F & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -q_F \tan \theta_F \end{bmatrix}.$$

定义 $\mathbf{P}_{O1} = [\xi_O \ \eta_O \ \zeta_O]^T$, $\mathbf{P}_{P1} = [\xi_P \ \eta_P \ \zeta_P]^T$, $\mathbf{P}_{e1} = [x_e \ y_e \ z_e]^T$, 则位置误差为 $\mathbf{P}_{e1} = [x_e \ y_e \ z_e]^T = \mathbf{R}_1 (\mathbf{P}_{O1} - \mathbf{P}_{P1})$, 对 $\mathbf{P}_{e1}$ 求导并左乘 $\mathbf{P}_{e1}^T$, 得

$$\mathbf{P}_{e1}^T \dot{\mathbf{P}}_{e1} = \mathbf{P}_{e1}^T [\mathbf{R}_1 (\mathbf{P}_{O1} - \mathbf{P}_{P1}) + \mathbf{R}_1 (\dot{\mathbf{P}}_{O1} - \dot{\mathbf{P}}_{P1})] =$$

$$\mathbf{P}_{e1}^T \mathbf{S}_1 \mathbf{R}_1 (\mathbf{P}_{O1} - \mathbf{P}_{P1}) + \mathbf{P}_{e1}^T \mathbf{R}_1 (\dot{\mathbf{P}}_{O1} - \dot{\mathbf{P}}_{P1}) =$$

$$\mathbf{P}_{e1}^T \mathbf{S}_1 \mathbf{P}_{e1} + \mathbf{P}_{e1}^T \mathbf{R}_1 (\dot{\mathbf{P}}_{O1} - \dot{\mathbf{P}}_{P1}) =$$

$$\mathbf{P}_{e1}^T \mathbf{R}_1 (\dot{\mathbf{P}}_{O1} - \dot{\mathbf{P}}_{P1}),$$

消去上式两边的 $\mathbf{P}_{e1}^T$, 得 $\dot{\mathbf{P}}_{e1} = \mathbf{R}_1 (\dot{\mathbf{P}}_{O1} - \dot{\mathbf{P}}_{P1})$.

根据关系式:

$$\mathbf{R}_1 \mathbf{P}_{O1} = \begin{bmatrix} \cos \psi_e^W \cos \theta_e^W & -\sin \psi_e^W & \cos \psi_e^W \sin \theta_e^W \\ \sin \psi_e^W \cos \theta_e^W & \cos \psi_e^W & \sin \psi_e^W \sin \theta_e^W \\ -\sin \theta_e^W & 0 & \cos \theta_e^W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_1 \dot{\mathbf{P}}_{P1} = [u_F \ 0 \ 0]^T,$$

可得

$$\dot{\mathbf{P}}_{e1} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{z}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_l \cos \psi_e^w \cos \theta_e^w - u_F \\ u_l \sin \psi_e^w \cos \theta_e^w \\ -u_l \sin \theta_e^w \end{bmatrix}. \quad (4)$$

但是误差模型(4)中的 u_l 、 θ_e^w 、 ψ_e^w 不便于测量和应用,所以还需要作进一步处理. 定义

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{02}^B &= [\theta \quad \psi]^T, \\ \mathbf{P}_{02}^W &= [\theta^W \quad \psi^W]^T = \mathbf{P}_{02}^B + [\alpha \quad \beta]^T, \\ \mathbf{P}_{p2} &= [\theta_F \quad \psi_F]^T, \end{aligned}$$

姿态误差:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{e2}^B &= [\theta_e^B \quad \psi_e^B]^T = \mathbf{R}_2(\mathbf{P}_{02}^B - \mathbf{P}_{p2}), \\ \mathbf{P}_{e2}^W &= [\theta_e^W \quad \psi_e^W]^T = \mathbf{R}_2(\mathbf{P}_{02}^W - \mathbf{P}_{p2}) = \mathbf{P}_{e2}^B + [\alpha \quad \beta \cos \theta_F]^T. \end{aligned}$$

将 $\dot{y}_e$ 展开可得

$\dot{y}_e = u_l \cos \theta_e^w \sin \psi_e^B \cos(\beta \cos \theta_F) + u_l \cos \theta_e^w \cdot \cos \psi_e^B \sin(\beta \cos \theta_F)$, 因为 $\beta \cos \theta_F$ 比较小, 所以 $\cos(\beta \cos \theta_F) \approx 1$, $\sin(\beta \cos \theta_F) \approx \beta$, 不妨设 $u_l = k_u u_r$, $0 < k_u < \bar{k}_u$, $\cos \theta_e^w = k_\theta \cos \theta_e^B$, $0 < k_\theta < \bar{k}_\theta$, $0 < k_y = k_u k_\theta < \bar{k}_u \bar{k}_\theta$, $\bar{k}_u$ 、 $\bar{k}_\theta$ 分别为 k_u 、 k_θ 的上界, 则 $\dot{y}_e$ 可重写为 $\dot{y}_e = k_y u_r \cos \theta_e^B \sin \psi_e^B + k_y u_r \cos \theta_e^B \cos \psi_e^B \beta$. 同理 $\dot{z}_e$ 可以重新整理为 $\dot{z}_e = -k_u u_r \sin \theta_e^B - k_u u_r \cos \theta_e^B \alpha$. 用 u_r 、 θ_e^B 、 ψ_e^B 代替 u_l 、 θ_e^w 、 ψ_e^w , 则 $\dot{x}_e$ 可以重新整理为 $\dot{x}_e = u_r \cos \psi_e^B \cos \theta_e^B - u_F + d_x$, 其中 d_x 为不确定项. 综上所述, 位置误差模型(4)最终重新整理为

$$\dot{\mathbf{P}}_{e1} = \begin{bmatrix} u_r \cos \psi_e^B \cos \theta_e^B - u_F + d_x \\ k_y u_r \cos \theta_e^B \sin \psi_e^B + k_y u_r \cos \theta_e^B \cos \psi_e^B \beta \\ -k_u u_r \sin \theta_e^B - k_u u_r \cos \theta_e^B \alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对姿态误差 $\mathbf{P}_{e2}^B$ 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}}_{e2}^B &= \dot{\mathbf{R}}_2(\mathbf{P}_{02}^B - \mathbf{P}_{p2}) + \mathbf{R}_2(\dot{\mathbf{P}}_{02}^B - \dot{\mathbf{P}}_{p2}) = \\ &\mathbf{S}_2 \mathbf{P}_{e2}^B + \mathbf{R}_2(\dot{\mathbf{P}}_{02}^B - \dot{\mathbf{P}}_{p2}) = \\ &\begin{bmatrix} q - q_F \\ -q_F \psi_e^B \tan \theta_F + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} r - r_F \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

3 三维路径跟踪控制器设计

本文路径跟踪控制的目的是使 AUV 收敛到期望路径, 并使 AUV 的纵向相对速度 u_r 保持恒定. 所以控制目标为

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} u_r(t) = u_{rd}; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} x_e(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} y_e(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} z_e(t) = 0; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e^W(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \psi_e^W(t) = 0. \end{cases}$$

3.1 运动学控制器的设计

1) 镇定 x_e . 定义 $\tilde{d}_x = d_x - \hat{d}_x$, $\hat{d}_x$ 为 d_x 的估计值.

可以认为 d_x 为慢时变信号, 则 $\dot{\tilde{d}}_x = -\dot{\hat{d}}_x$. 选取

Lyapunov 函数为 $V_1 = \frac{1}{2}x_e^2 + \frac{1}{2k_1}\tilde{d}_x^2$, 对 V_1 求导得

$$\dot{V}_1 = x_e(u_r \cos \psi_e^B \cos \theta_e^B - u_F + \hat{d}_x) + \tilde{d}_x \left(x_e - \frac{1}{k_1} \dot{\hat{d}}_x \right).$$

设计虚拟向导和自适应控制律为

$$\begin{cases} u_F = u_r \cos \psi_e^B \cos \theta_e^B + k_2 x_e + \hat{d}_x, & k_2 > 0; \\ \dot{\hat{d}}_x = k_1 x_e, & k_1 > 0. \end{cases} \quad (7)$$

可得 $\dot{V}_1 = -k_2 x_e^2 \leq 0$.

2) 镇定 y_e 和 z_e . 要实现对 y_e 和 z_e 的镇定, 需要选择合适的导引律, 如果使用传统的 LOS 导引律

$$\theta_{ed}^B = \tan^{-1} \left(\frac{z_e}{\Delta_\theta} \right), \psi_{ed}^B = -\tan^{-1} \left(\frac{y_e}{\Delta_\psi} \right), \Delta_\theta > 0, \Delta_\psi > 0,$$

其中 θ_{ed}^B 、 ψ_{ed}^B 分别为 θ_e^B 、 ψ_e^B 的期望值, 将 $\theta_e^B = \theta_{ed}^B$ 、 $\psi_e^B = \psi_{ed}^B$ 代入误差模型(4), 可得

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= -u_l \cos \theta_e^w \left[\frac{y_e \cos(\beta \cos \theta_F)}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + y_e^2}} - \frac{\Delta_\psi \sin(\beta \cos \theta_F)}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + y_e^2}} \right], \\ \dot{z}_e &= -u_l \left[\frac{z_e}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + z_e^2}} \cos \alpha + \frac{\Delta_\theta}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + z_e^2}} \sin \alpha \right]. \end{aligned}$$

令 $\dot{y}_e = 0$, $\dot{z}_e = 0$, 可得 y_e 和 z_e 的稳态值分别为

$$|y_{ess}| = \Delta_\psi |\tan(\beta \cos \theta_F)| \leq \Delta_\psi |\tan \bar{\beta}| \approx \Delta_\psi |\bar{\beta}|,$$

$$|z_{ess}| = \Delta_\theta |\tan \alpha| \leq \Delta_\theta |\tan \bar{\alpha}| \approx \Delta_\theta |\bar{\alpha}|.$$

式中 $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$ 分别为 α 、 β 的上界. 显然, 如果 α 、 β 不为零, y_e 、 z_e 会存在稳态误差. 为了消除稳态误差, 设计 ILOS 导引律为

$$\begin{cases} \theta_{ed}^B = \tan^{-1} \left(\frac{z_e - \alpha_c}{\Delta_\theta} \right), \\ \psi_{ed}^B = -\tan^{-1} \left(\frac{y_e + \beta_c}{\Delta_\psi} \right). \end{cases} \quad (8)$$

定义 $\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}$, $\tilde{\beta} = \beta - \hat{\beta}$, $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ 分别为 α 、 β 的估计值. 选取 Lyapunov 函数

$$V_2 = \frac{1}{2}z_e^2 + \frac{1}{2}y_e^2 + \frac{k_u}{2k_3}\tilde{\alpha}^2 + \frac{k_y}{2k_4}\tilde{\beta}^2,$$

令 $u_r = u_{rd}$, $\theta_e^B = \theta_{ed}^B$, $\psi_e^B = \psi_{ed}^B$, 根据式(5)、(8)对 V_2 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= z_e \left(-\frac{k_u u_{rd}(z_e - \alpha_c)}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}} - \frac{k_u u_{rd} \Delta_\theta}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}} \hat{\alpha} \right) - \\ &\tilde{\alpha} k_u \left(\frac{1}{k_3} \dot{\hat{\alpha}} + \frac{u_{rd} \Delta_\theta}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}} z_e \right) + \end{aligned}$$

$$y_e \left(-\frac{k_y u_{rd} \cos \theta_e^B (y_e + \beta_c)}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}} + \frac{k_y u_{rd} \cos \theta_e^B \Delta_\psi}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}} \hat{\beta} \right) + \tilde{\beta} k_y \left(\frac{u_{rd} \cos \theta_e^B \Delta_\psi}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}} y_e - \frac{1}{k_4} \hat{\beta} \right).$$

设计控制律和自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_c = \Delta_\theta \hat{\alpha}; \\ \dot{\alpha} = -k_\alpha \frac{k_3 u_{rd} \Delta_\theta}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}} z_e, \\ k_3 > 0, k_\alpha = \begin{cases} 0, & |z_e| > \Delta_z, \\ 1, & |z_e| \leq \Delta_z; \end{cases} \\ \dot{\beta}_c = \Delta_\psi \hat{\beta}; \\ \dot{\beta} = k_\beta \frac{k_4 u_{rd} \cos \theta_e^B \Delta_\psi}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}} y_e, \\ k_4 > 0, k_\beta = \begin{cases} 0, & |y_e| > \Delta_y, \\ 1, & |y_e| \leq \Delta_y. \end{cases} \end{cases}$$

式中: Δ_z, Δ_y 为边界层厚度,当 AUV 位于边界层以外时 $k_\alpha = 0, k_\beta = 0$, 式(8)退化为 LOS 导引律,这样可以减少超调,当 AUV 位于边界层以内时启动积分项消除稳态误差. 只要设置 $\Delta_y > |y_{\text{ess}}|, \Delta_z > |z_{\text{ess}}|$ 就可以保证 AUV 进入边界层以内,最终可得

$$V_2 = -\frac{k_u u_{rd}}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}} z_e^2 - \frac{k_y u_{rd} \cos \theta_e^B}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}} y_e^2 \leq 0.$$

3.2 动力学控制器的设计

1) 镇定 u_{re} . 定义误差变量为

$$\begin{cases} u_{re} = u_r - u_{rd}, \\ \tilde{\psi}_e^B = \psi_e^B - \psi_{ed}^B, \\ \tilde{\theta}_e^B = \theta_e^B - \theta_{ed}^B. \end{cases} \quad (9)$$

因为 u_{rd} 为常值,根据式(3)、(9)可得

$$\dot{u}_{re} = \dot{u}_r - \dot{u}_{rd} = F_u u_r + F_X X_\tau + d_u X.$$

定义 $\tilde{d}_u = d_u - \hat{d}_u, \hat{d}_u, d_u$ 的估计值. 选取

Lyapunov 函数 $V_3 = \frac{1}{2} u_{re}^2 + \frac{1}{2k_5} \tilde{d}_u^2$, 对 V_3 求得

$$\dot{V}_3 = u_{re} (F_u u_r + F_X X_\tau + \hat{d}_u) + \tilde{d}_u \left(u_{re} - \frac{1}{k_5} \hat{d}_u \right).$$

设计控制律和自适应律为

$$\begin{cases} X_\tau = \frac{1}{F_X} [-F_u u_r - \hat{d}_u - k_6 u_{re} - \varepsilon_1 \text{sig}(u_{re})], \\ \text{sig}(u_{re}) = \frac{1 - e^{-k_7 u_{re}}}{1 + e^{-k_7 u_{re}}} = \text{sgn}(u_{re}) \left| \frac{1 - e^{-k_7 u_{re}}}{1 + e^{-k_7 u_{re}}} \right|, \\ \dot{\hat{d}}_u = k_5 u_{re}, k_5 > 0, k_6 > 0, k_7 > 0, \varepsilon_1 > 0. \end{cases} \quad (10)$$

可得 $\dot{V}_3 = -k_6 u_{re}^2 - \varepsilon_1 |u_{re}| \left| \frac{1 - e^{-k_7 u_{re}}}{1 + e^{-k_7 u_{re}}} \right| \leq 0$. 式(10)

中 sig 和 sgn 分别代表 Sigmoid 函数和符号函数,用 Sigmoid 函数设计滑模项,可以削弱抖振.

2) 镇定 $\tilde{\psi}_e^B$. 选取 Lyapunov 函数 $V_4 = \frac{1}{2} (\tilde{\psi}_e^B)^2$,

根据式(6)对 V_4 求导得

$$\dot{V}_4 = \tilde{\psi}_e^B \dot{\tilde{\psi}}_e^B = \tilde{\psi}_e^B \left(-q_F \psi_e^B \tan \theta_F + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} r - r_F - \dot{\psi}_{ed}^B \right).$$

设计 r 的期望值为

$$r_d = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_F} (\psi_{ed}^B + q_F \psi_e^B \tan \theta_F + r_F - k_8 \tilde{\psi}_e^B), k_8 > 0,$$

定义误差变量 $r_e = r - r_d$, 得 $\dot{V}_4 = -k_8 (\tilde{\psi}_e^B)^2 + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e^B r_e$. 根据式(3)对 r_e 求导可得 $\dot{r}_e = \dot{r} - \dot{r}_d =$

$F_r r + F_N N_\tau + d_r - \dot{r}_d$, 定义 $\tilde{d}_r = d_r - \hat{d}_r, \hat{d}_r$ 为 d_r 的估计值. 选取 Lyapunov 函数 $V_5 = V_4 + \frac{1}{2} r_e^2 + \frac{1}{2k_9} \tilde{d}_r^2$, 对 V_5 求得

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 = & -k_8 (\tilde{\psi}_e^B)^2 + \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e^B r_e + \\ & r_e (F_r r + F_N N_\tau + \hat{d}_r - \dot{r}_d) + \tilde{d}_r \left(r_e - \frac{1}{k_9} \hat{d}_r \right), \end{aligned}$$

设计控制律和自适应律为

$$\begin{cases} N_\tau = \frac{1}{F_N} \left[\dot{r}_d - F_r r - \frac{\cos \theta_F}{\cos \theta} \tilde{\psi}_e^B \hat{d}_r - k_{10} r_e - \varepsilon_2 \text{sig}(r_e) \right], \\ \text{sig}(r_e) = \frac{1 - e^{-k_7 r_e}}{1 + e^{-k_7 r_e}} = \text{sgn}(r_e) \left| \frac{1 - e^{-k_7 r_e}}{1 + e^{-k_7 r_e}} \right|, \\ \dot{\hat{d}}_r = k_9 r_e, k_9 > 0, k_{10} > 0, \varepsilon_2 > 0. \end{cases} \quad (11)$$

可得

$$\dot{V}_5 = -k_8 (\tilde{\psi}_e^B)^2 - k_{10} r_e^2 - \varepsilon_2 |r_e| \left| \frac{1 - e^{-k_7 r_e}}{1 + e^{-k_7 r_e}} \right| \leq 0.$$

3) 镇定 $\tilde{\theta}_e^B$. 选取 Lyapunov 函数 $V_6 = \frac{1}{2} (\tilde{\theta}_e^B)^2$,

根据式(6)对 V_6 求导得 $\dot{V}_6 = \tilde{\theta}_e^B \dot{\tilde{\theta}}_e^B = \tilde{\theta}_e^B (q - q_F - \dot{\theta}_{ed}^B)$. 设计 q 的期望值为 $q_d = \dot{\theta}_{ed}^B + q_F - k_{11} \tilde{\theta}_e^B, k_{11} > 0$, 定义误差变量 $q_e = q - q_d$, 可得 $\dot{V}_6 = -k_{11} (\tilde{\theta}_e^B)^2 + \tilde{\theta}_e^B q_e$.

根据式(3)对 q_e 求导,可得

$$\dot{q}_e = \dot{q} - \dot{q}_d = F_q q + F_M M_{\text{HS}} + F_M M_\tau + d_q - \dot{q}_d,$$

定义 $\tilde{d}_q = d_q - \hat{d}_q, \hat{d}_q$ 为 d_q 的估计值. 选取 Lyapunov

函数 $V_7 = V_6 + \frac{1}{2}q_e^2 + \frac{1}{2k_{12}}\tilde{d}_q^2x$, 对 V_7 求导得

$$\dot{V}_7 = -k_{11}(\tilde{\theta}_e^B)^2 + \tilde{\theta}_e^B q_e + \tilde{d}_q \left(q_e - \frac{1}{k_{12}} \dot{d}_q \right) + q_e (F_q q + F_M M_{HS} + F_M M_\tau + \dot{d}_q - \dot{q}_d).$$

设计控制律和自适应律为

$$\begin{cases} M_\tau = \frac{1}{F_M} [\dot{q}_d - F_q q - F_M M_{HS} - \tilde{\theta}_e^B - \dot{d}_q - k_{13} q_e - \varepsilon_3 \text{sig}(q_e)], \\ \text{sig}(q_e) = \frac{1 - e^{-k_7 q_e}}{1 + e^{-k_7 q_e}} = \text{sgn}(q_e) \left| \frac{1 - e^{-k_7 q_e}}{1 + e^{-k_7 q_e}} \right|, \\ \dot{d}_q = k_{12} q_e, \quad k_{12} > 0, k_{13} > 0, \varepsilon_3 > 0. \end{cases} \quad (12)$$

可得

$$\dot{V}_7 = -k_{11}(\tilde{\theta}_e^B)^2 - k_{13} q_e^2 - \varepsilon_3 |q_e| \left| \frac{1 - e^{-k_7 q_e}}{1 + e^{-k_7 q_e}} \right| \leq 0.$$

控制律 (10) ~ (12) 分别得到的是螺旋桨和舵产生的推力和力矩, 螺旋桨转速 n , 水平舵角 δ_s , 方向舵角 δ_R 的水动力方程计算公式为

$$n = \sqrt{\frac{X_\tau}{K_T \rho D_p^4}}, \delta_s = \frac{M_\tau}{x_{fin} k_L}, \delta_R = \frac{N_\tau}{x_{fin} k_L}.$$

式中 ρ 、 K_T 、 D_p 、 K_L 、 x_{fin} 分别为流体密度、螺旋桨推力系数、螺旋桨直径、舵升力系数、舵力臂。

3.3 闭环系统的稳定性分析

在前面运动学控制器设计中假设 $u_r = u_{rd}$, $\theta_e^B = \theta_{ed}^B$, $\psi_e^B = \psi_{ed}^B$, 但由于系统动力学特性的影响, u_r 、 θ_e^B 、 ψ_e^B 达到期望值需要响应时间。接下来对运动学和动力学组成的闭环系统的稳定性进行分析。定义误差变量 $e = [\tilde{d}_x \quad \tilde{\alpha} \quad \tilde{\beta} \quad u_{re} \quad \tilde{\theta}_e^B \quad \tilde{\psi}_e^B]$, 根据式 (7) ~ (9), 误差方程 (5) 可以重新整理为

$$\dot{P}_{e1} = AP_{e1} + Be. \quad (13)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{23} & B_{24} & 0 & B_{26} \\ 0 & B_{32} & 0 & B_{34} & B_{35} & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = -k_2, A_{22} = -\frac{k_y u_{rd} \cos \theta_e^B}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}},$$

$$A_{33} = -\frac{k_u u_{rd}}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}},$$

$$B_{11} = 1, B_{23} = \frac{k_y u_{rd} \cos \theta_e^B \Delta_\psi}{\sqrt{\Delta_\psi^2 + (y_e + \beta_c)^2}},$$

$$B_{24} = k_y \cos \theta_e^B \sin \psi_e^B + k_y \cos \theta_e^B \cos \psi_e^B \beta,$$

$$B_{26} = \left(\frac{k_y u_{rd} \cos \theta_e^B \sin \psi_{ed}^B + k_y u_{rd} \beta \cos \theta_e^B \cos \psi_{ed}^B}{\tilde{\psi}_e^B} \right) \frac{(\cos \tilde{\psi}_e^B - 1)}{\tilde{\psi}_e^B} +$$

$$(k_y u_{rd} \cos \theta_e^B \cos \psi_{ed}^B - k_y u_{rd} \beta \cos \theta_e^B \sin \psi_{ed}^B)$$

$$\frac{\sin \tilde{\psi}_e^B}{\tilde{\psi}_e^B}, B_{32} = -\frac{k_u u_{rd} \Delta_\theta}{\sqrt{\Delta_\theta^2 + (z_e - \alpha_c)^2}},$$

$$B_{34} = -(k_u \sin \theta_e^B + k_u \cos \theta_e^B \alpha),$$

$$B_{35} = (k_u u_{rd} \alpha \sin \theta_{ed}^B - k_u u_{rd} \cos \theta_{ed}^B) \frac{\sin \tilde{\theta}_e^B}{\tilde{\theta}_e^B} -$$

$$(k_u u_{rd} \sin \theta_{ed}^B + k_u u_{rd} \alpha \cos \theta_{ed}^B) \frac{(\cos \tilde{\theta}_e^B - 1)}{\tilde{\theta}_e^B}.$$

可以认为系统 (13) 是名义系统 $\dot{P}_{e1} = AP_{e1}$ 通过 B 受 e 的干扰组成的级联系统。因为矩阵 A 是负定的, 所以名义系统 $\dot{P}_{e1} = AP_{e1}$ 是稳定的, 误差变量 e 的稳定性在前面的控制器设计中也得到证明。因为 k_u 、 k_y 、 u_{rd} 、 α 、 β 均是有界的, 根据

$$\|B_1\|_1 = |B_{11}| = 1,$$

$$\|B_2\|_1 = |B_{23}| + |B_{24}| + |B_{26}| \leq k_y u_{rd} + k_y (1 + 2u_{rd}) (1 + |\beta|),$$

$$\|B_3\|_1 = |B_{32}| + |B_{34}| + |B_{35}| \leq k_u u_{rd} + k_u (1 + 2u_{rd}) (1 + |\alpha|).$$

可知 B 也是有界的。所以根据非线性级联系统理论可得系统 (13) 是渐进稳定的。

4 仿真结果与分析

本文采用美国 Hydroid 公司的 REMUS-100 作为仿真模型, 具体参数可详见文献 [15]。期望速度 $u_{rd} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 海流速度 $v_c^I = [0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]^T$ 。控制器的设计参数分别为 $k_1 = 0.1$, $k_2 = 0.2$, $k_3 = 0.02$, $k_4 = 0.05$, $k_5 = 0.1$, $k_6 = 1$, $k_7 = 25$, $k_8 = 0.1$, $k_9 = 0.1$, $k_{10} = 1$, $k_{12} = 0.1$, $k_{12} = 0.1$, $k_{13} = 1$, $\Delta_\theta = 6$, $\Delta_\psi = 6$, $\Delta_z = 2$, $\Delta_y = 2$, $\varepsilon_1 = 0.3$, $\varepsilon_2 = 0.1$, $\varepsilon_3 = 0.1$ 。期望路径是基于表 1 所列的路径点生成, 第一段路径为螺旋线, 半径和螺距分别为 20、40 m, 其余路径由直线和圆弧组成, 圆弧半径为 10 m。仿真采用了两种控制方法进行对比, 方法 1 采用本文提出的控制方法, 方法 2 的运动学控制器采用文献 [5] 提出了 ILOS 导引律, 动力学控制器采用 PID 控制器。为了验证控制器的鲁棒性, 仿真时段 0~120 s 水动力参数相对于名义参数增加 20%,

120~240 s 采用名义水动力参数,240~350 s 水动力参数相对于名义参数减小 20%。AUV 的初始状态为 0,期望路径的初始位置和方向为 $\boldsymbol{P}_p(0) = [0 \quad -20 \quad 5 \quad -\tan^{-1}(1/\pi) \quad 0]^T$ 。

表 1 路径点
Tab.1 Waypoints

路径点	ξ/m	η/m	ζ/m
1	0	-20	5
2	0	-20	45
3	80	-20	45
4	80	0	45
5	40	0	45
6	40	20	45
7	80	20	45

仿真结果见图 4~8,图 4 为三维路径跟踪曲线和在水平面、垂直面的投影,可以清晰的看出在存在海流和模型不确定性的情况下,两种控制方法都能实现路径的良好跟踪,但通过对比也可看出方法 1 的超调量要小的多;图 5 为跟踪误差曲线,通过图 5(a)、5(b)可以看出位置误差和姿态误差虽然在路径切换时会出现一定的波动,但很快能够稳定下来并全部趋于零。图 5(c)、5(d)分别为纵倾角和艏摇角误差曲线,纵倾角和艏摇角误差在初始阶段会迅速增大,从而可以有效的减少位置误差,随着位置误差趋于稳定,姿态误差也趋于稳定,应该注意因为要对漂角进行补偿克服海流的影响,艏摇角误差并没有趋于零。

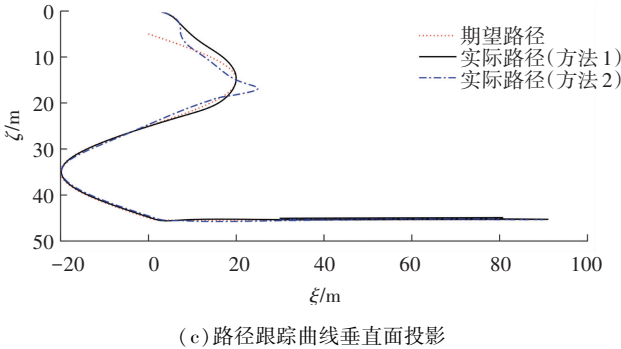
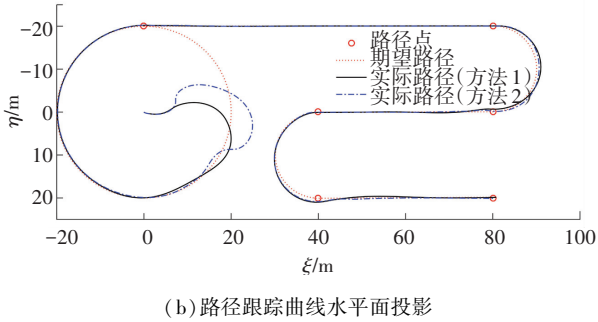
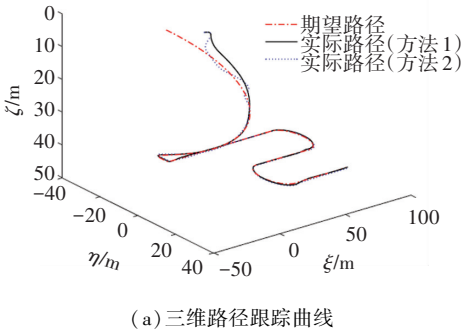


图 4 路径跟踪曲线

Fig.4 Curves of path-following

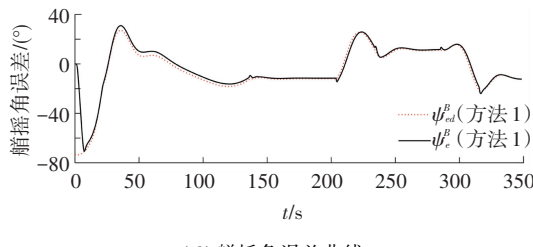
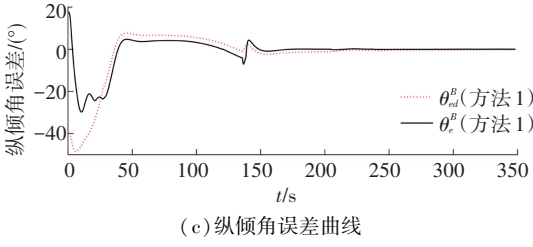
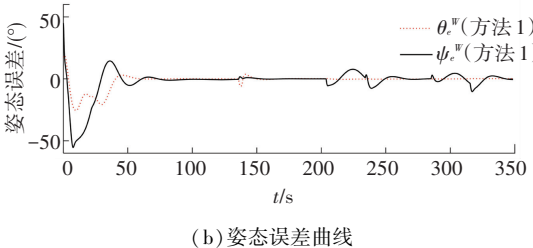
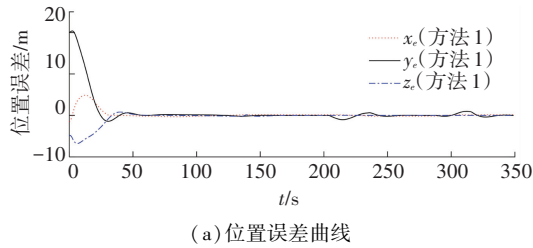


图 5 路径跟踪误差曲线

Fig.5 Error curves of path-following

图 6 为攻角、漂角和它们估计值曲线,能够看出自适应律可以较好的实现对抗角、漂角的估计. 图 7 为控制输入曲线,可以看到在路径切换时控制输入会产生波动,原因是路径切换时路径曲率不连续,但方法 1 的控制输入更加平稳一些,抖振也比较小. 图 8 为速度和速度误差曲线,通过图 8(a)可以看到 AUV 的相对速度能很好的收敛到期望值, AUV 的绝

对速度由于受海流的影响,顺流时会增大,逆流时会减小,虚拟向导的速度能很好的收敛到 AUV 的绝对速度. 通过图 8(b)、8(c)可以看到,纵倾角速度和艏摇角速度都能收敛到期望值. 通过图 8(d)~8(f)可以看到纵向速度误差、纵倾角速度误差和艏摇角速度误差均收敛到零.

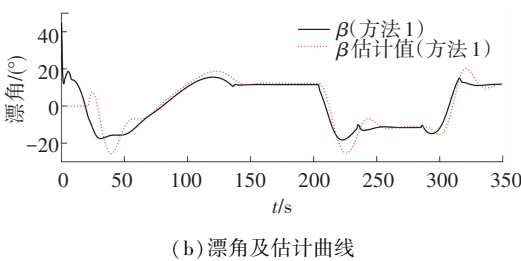
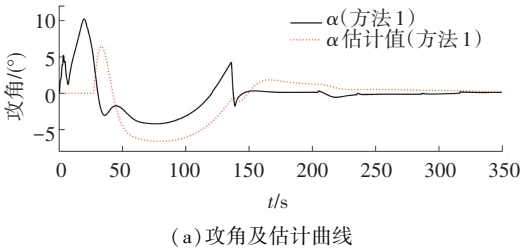


图 6 攻角和漂角曲线
Fig.6 Curves of attack and sideslip angles

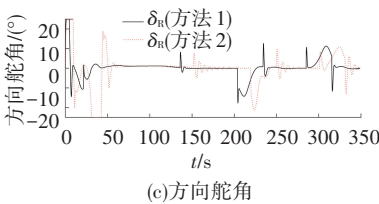
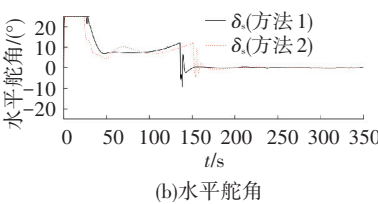
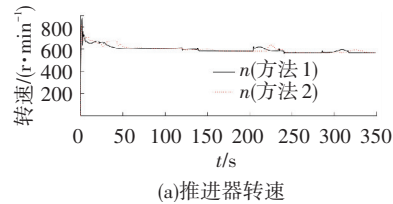


图 7 控制输入曲线
Fig.7 Curves of control inputs

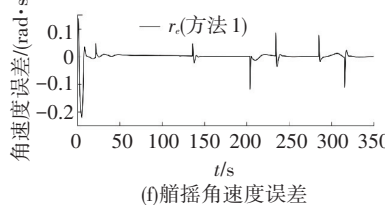
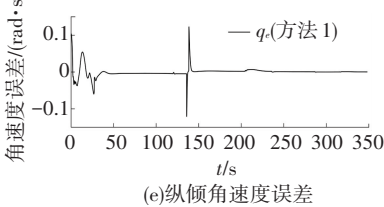
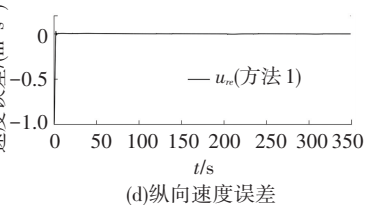
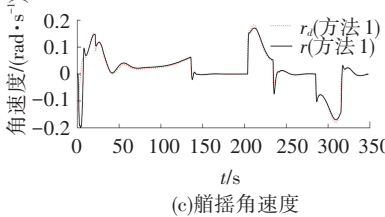
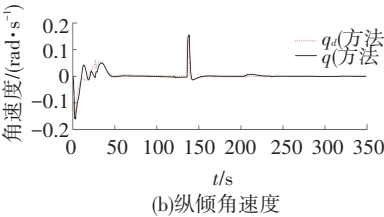
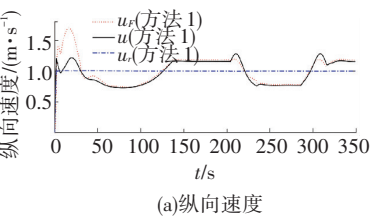


图 8 速度和速度误差曲线
Fig.8 Curves of velocities and velocity errors

5 结 论

- 1) 基于 Serret-Frenet 坐标系引入了虚拟向导并建立了三维路径跟踪误差模型.
- 2) 在运动学控制中设计了具有自适应律的虚拟向导并提出了一种改进的积分视线法 (ILOS) 导引律.
- 3) 基于反步自适应滑模控制 (BASM) 理论设

- 计了动力学控制器,并应用 Sigmoid 函数设计滑模项,保证了系统的稳定性和鲁棒性、有效的削弱了抖振.
- 4) 应用非线性级联理论证明了整个控制系统的闭环稳定性,从而解决了存在海流干扰和模型不确定性情况下欠驱动 AUV 的三维路径跟踪控制问题.
- 5) 控制器的设计是基于 AUV 与流体的相对速

度,由于相对速度更便于测量,所以与基于绝对速度的控制方法相比,更便于工程应用.

参考文献

[1] 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
WANG Fang, WAN Lei, LI Ye, et al. A survey on development of motion control for underactuated AUV[J]. Shipbuilding of China, 2010, 51(2): 227

[2] LEKKAS A M, FOSSEN T I. A time-varying lookahead distance guidance law for path following[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(27): 398

[3] XU H, SOARES C G. Vector field path following for surface marine vessel and parameter identification based on LS-SVM[J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 151

[4] LAPIERRE L, SOETANTO D. Nonlinear path-following control of an AUV[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(11): 1734

[5] CAHARIJA W, PETTERSEN K Y, BIBULI M, et al. Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: theory, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1623

[6] FOSSEN T I, PETTERSEN K Y, GALEAZZI R. Line-of-sight path following for Dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2): 820

[7] CAHARIJA W, PETTERSEN K Y, SØRENSEN A J, et al. Relative velocity control and integral line of sight for path following of autonomous surface vessels: merging intuition with theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2014, 228(2): 180

[8] 李岳明, 万磊, 孙玉山, 等. 水下机器人高度信息融合与欠驱动地形跟踪控制[J].控制理论与应用, 2013, 30(1): 118
LI Yueming, WAN Lei, SUN Yushan, et al. Altitude information fusion and bottom-following control for underactuated autonomous underwater vehicle[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(1):118

[9] FOSSEN T I, LEKKAS A M. Direct and indirect adaptive integral line-of-sight path-following controllers for marine craft exposed to ocean currents[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2017, 31(4): 445

[10] 边信黔, 程相勤, 贾鹤鸣, 等. 基于迭代滑模增量反馈的欠驱动 AUV 地形跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 289
BIAN Xinqian, CHENG Xiangqin, JIA Heming, et al. A bottom-following controller for underactuated AUV based on iterative sliding and increment feedback[J]. Control and Decision, 2011, 26(2): 289

[11] LI Ye, WEI Cong, WU Qi, et al. Study of 3 dimension trajectory tracking of underactuated autonomous underwater vehicle[J]. Ocean Engineering, 2015, 105: 270

[12] 葛晖, 敬忠良, 高剑. 自主式水下航行器三维路径跟踪的神经网络 H_{∞} 鲁棒自适应控制方法[J].控制理论与应用, 2012, 29(3): 317
GE Hui, JING Zhongliang, GAO Jian. Neural network H_{∞} robust adaptive control for autonomous underwater vehicle in 3-dimensional path following[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(3): 317

[13] 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
WANG Hongjian, CHEN Ziyin, JIA Heming, et al. Three-dimensional path-following control of underactuated autonomous underwater vehicle with command filtered back-stepping[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(3): 631

[14] 李娟, 边信黔, 熊华胜, 等. AUV 的精确航迹跟踪系统的鲁棒控制[J].哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(1): 112
LI Juan, BIAN Xinqian, XIONG Huasheng, et al. Robust control research for AUV trajectory control system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(1): 112

[15] PRESTERO T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001

(编辑 魏希柱)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“海流干扰下的欠驱动 AUV 三维路径跟踪控制”,是欠驱动自主水下航行器(AUV)在三维空间进行路径跟踪时的水平面控制原理图,其在垂直面同理. 首先,应用非线性级联理论设计了路径跟踪控制系统,该控制系统分为运动学控制器和动力学控制器两部分. 然后,在运动学控制器中基于 Serret-Frenet 坐标系引入虚拟向导并建立三维路径跟踪误差模型,设计了具有自适应律的虚拟向导,并提出了一种改进的积分视线法(ILOS)导引律. 最后,基于 AUV 与流体的相对速度,应用反步自适应滑模控制(BASMC)理论设计了动力学控制器,并应用 Sigmoid 函数设计滑模项,保证了系统的稳定性和鲁棒性、有效地削弱了抖振. 该控制器能够有效克服海流和模型不确定的影响,实现欠驱动 AUV 对三维路径的跟踪,解决了存在海流干扰和模型不确定性情况下欠驱动 AUV 的三维路径跟踪控制问题.

(图文提供:姚绪梁,王晓伟,蒋晓刚,王峰. 哈尔滨工程大学自动化学院)