



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110308735 B

(45) 授权公告日 2022.07.15

(21) 申请号 201910597280.1

CN 108519736 A, 2018.09.11

(22) 申请日 2019.07.04

CN 106227223 A, 2016.12.14

(65) 同一申请的已公布的文献号

WO 2017102092 A1, 2017.06.22

申请公布号 CN 110308735 A

于浩淼. 非线性因素约束下欠驱动UUV轨迹跟踪控制方法研究.《中国博士学位论文全文数据库·工程科技II辑》.2018,

(43) 申请公布日 2019.10.08

肖遥. 含状态时滞的欠驱动UUV深度控制方法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库·工程科技II辑》.2018,

(66) 本国优先权数据

201910176339.X 2019.03.08 CN

Jiajia Zhou, Xinyi Zhao, Zhiguang Feng, Di Wu. Trajectory tracking sliding mode control for underactuated autonomous underwater vehicles with time delays.《International Journal of Advanced Robotic Systems》.2020,

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

Xianbo Xiang, Caoyang Yu, Qin Zhang. Robust fuzzy 3D path following for autonomous underwater vehicle subject to uncertainties.《Computers & Operations Research》.2016,

(72) 发明人 周佳加 赵欣怡 吴迪 孙庆鹏
严浙平 叶丁绮

(51) Int. Cl.

G05D 1/06 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 107024863 A, 2017.08.08

CN 106444806 A, 2017.02.22

CN 108319138 A, 2018.07.24

CN 104076821 A, 2014.10.01

审查员 徐达

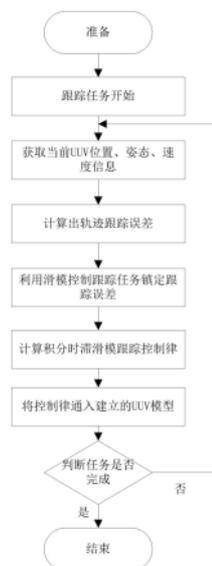
权利要求书7页 说明书19页 附图9页

(54) 发明名称

一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法

(57) 摘要

本发明属于水下无人飞行器控制研究领域,具体涉及一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法。本发明基于级联系统控制思想,针对外界未知有界干扰和参数摄动,计算消除虚拟控制误差的积分时滞滑模纵向、艏向和纵倾控制律,根据控制律调整UUV的纵向速度、艏向角速度和纵倾角速度,完成UUV轨迹跟踪滑模控制过程。本发明通过建立虚拟欠驱动UUV,将欠驱动UUV轨迹跟踪控制问题被转换成跟踪误差镇定问题,简化了计算过程;利用滑模控制,提高了系统的控制性能和鲁棒性,满足欠驱动UUV三维轨迹跟踪对位置、速度以及姿态的时间约束要求。



CN 110308735 B

[接上页]

(56) 对比文件

Jianming Miao;Shaoping Wang;Zhiping
Zhao;Yuan Li;Mileta M.Tomovi.Spatial

curvilinear path following control of
underactuated AUV with multiple
uncertainties.《ISA Transactions》.2017,

1. 一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:UUV通过所搭载的导航设备和传感器采集数据,获得当前的位置信息 $X(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ 、姿态信息 $[\theta(t), \psi(t)]^T$ 和速度信息 $V(t) = [u(t), v(t), w(t), q(t), r(t)]^T$;根据当前任务,确定UUV的期望位置与姿态信息 $P_d(t) = [x_d(t), y_d(t), z_d(t), \theta_d(t), \psi_d(t)]^T$;

其中, $x(t), y(t), z(t)$ 为固定坐标系下UUV在 $0x$ 轴, $0y$ 轴, $0z$ 轴的位置信息; $\theta(t)$ 为纵倾角; $\psi(t)$ 为艏向角; $u(t)$ 为纵向速度; $v(t)$ 为横向速度; $w(t)$ 为垂直甲板方向速度; $q(t)$ 为纵倾角速度; $r(t)$ 为偏航角速度; $x_d(t), y_d(t), z_d(t)$ 为期望位置; $\theta_d(t), \psi_d(t)$ 分别为期望纵倾角和艏向角;期望姿态由期望位置确定:

$$\begin{cases} \psi_d = \arctan \frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d} \\ \theta_d = -\arctan \frac{\dot{z}_d}{\sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}} \end{cases}$$

步骤2:将六自由度的UUV模型简化为欠驱动UUV五自由度时滞运动模型,对期望轨迹在当前时刻下的位置姿态信息进行求导,得到跟踪位置误差方程、跟踪姿态误差方程和跟踪速度误差方程:

欠驱动UUV五自由度模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_d = u_d \cos(\psi_d) \cos(\theta_d) - v_d \sin(\psi_d) + w_d \cos(\psi_d) \sin(\theta_d) \\ \dot{y}_d = u_d \sin(\psi_d) \cos(\theta_d) + v_d \cos(\psi_d) + w_d \sin(\psi_d) \sin(\theta_d) \\ \dot{z}_d = -u_d \sin(\theta_d) + w_d \cos(\theta_d) \\ \dot{\theta}_d = q_d \\ \dot{\psi}_d = r_d / \cos(\theta_d) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{u}_d = \frac{m_{22}}{m_{11}} v_d r_d - \frac{m_{33}}{m_{11}} w_d q_d - \frac{X_u}{m_{11}} u_d - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u_d |u_d| + \frac{1}{m_{11}} \tau_{ud} \\ \dot{v}_d = -\frac{m_{11}}{m_{22}} u_d r_d - \frac{Y_v}{m_{22}} v_d - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v_d |v_d| \\ \dot{w}_d = \frac{m_{11}}{m_{33}} u_d q_d - \frac{Z_w}{m_{33}} w_d - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}} w_d |w_d| \\ \dot{q}_d = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} u_d w_d - \frac{M_q}{m_{55}} q_d - \frac{M_{q|q|}}{m_{55}} q_d |q_d| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \tau_{qd} \\ \dot{r}_d = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} u_d v_d - \frac{N_r}{m_{66}} r_d - \frac{N_{r|r|}}{m_{66}} r_d |r_d| + \frac{1}{m_{66}} \tau_{rd} \end{cases}$$

其中, $m_{11} = m - X_{\ddot{u}}$; $m_{22} = m - Y_{\ddot{v}}$; $m_{33} = m - N_{\ddot{r}}$; $m_{55} = I_y - M_{\ddot{u}}$; $m_{66} = I_z - N_{\ddot{r}}$; m_{11} 、 m_{22} 、 m_{33} 、 m_{55} 、 m_{66} 表示包括附加质量在内的惯性系数; $X_u, X_{u|u|}, Y_v, Y_{v|v|}, Z_w, Z_{w|w|}, M_q, M_{q|q|}, N_r, N_{r|r|}$

为不同阶数的水动力阻尼系数;B为UUV所受浮力; \overline{GM}_L 为纵向稳心高; $\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d$ 为固定坐标系下期望速度; $\dot{\theta}_d, \dot{\psi}_d$ 为期望纵倾角速度和艏向角速度; u_d, v_d, w_d 和 $\dot{u}_d, \dot{v}_d, \dot{w}_d$ 分别为船体坐标系下期望速度和期望加速度; q_d, r_d 为期望纵倾角速度和偏航角速度; $\tau_{ud}, \tau_{qd}, \tau_{rd}$ 为主推器、垂直舵、水平舵的期望控制向量;

定义轨迹跟踪位姿和速度误差变量如下:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ \theta_e \\ \psi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ z - z_d \\ \theta - \theta_d \\ \psi - \psi_d \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ w_e \\ q_e \\ r_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_d \\ v - v_d \\ w - w_d \\ q - q_d \\ r - r_d \end{bmatrix}$$

跟踪位姿误差方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u_e \cos \psi \cos \theta - v_e \cos \psi \sin \theta + u_d (\cos \psi \cos \theta - \cos \psi_d \cos \theta_d) \\ \quad - v_d (\sin \psi - \sin \psi_d) + w_d (\cos \psi \sin \theta - \cos \psi_d \sin \theta_d) \\ \dot{y}_e = u_e \sin \psi \cos \theta + v_e \cos \psi + w_e \sin \psi \sin \theta + u_d (\sin \psi \cos \theta - \sin \psi_d \cos \theta_d) \\ \quad - v_d (\cos \psi - \cos \psi_d) + w_d (\sin \psi \sin \theta - \sin \psi_d \sin \theta_d) \\ \dot{z}_e = -u_e \sin \theta + w_e \cos \theta - u_d (\sin \theta - \sin \theta_d) + w_d (\cos \theta - \cos \theta_d) \\ \dot{\theta}_e = q_e \\ \dot{\psi}_e = \frac{r}{\cos \theta} - \frac{r_d}{\cos \theta_d} \end{cases}$$

跟踪速度误差方程如下:

$$\begin{cases} \dot{u}_e = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{m_{33}}{m_{11}} wq - \frac{X_u}{m_{11}} u - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u|u| - \dot{u}_d + \frac{1}{m_{11}} \omega_u + \frac{\tau_u (t - T_1')}{m_{11}} \\ \dot{v}_e = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{Y_v}{m_{22}} v - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v|v| - \dot{v}_d + \frac{\omega_v}{m_{22}} \\ \dot{w}_e = \frac{m_{11}}{m_{33}} uq - \frac{Z_w}{m_{33}} w - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}} w|w| - \dot{w}_d + \frac{\omega_w}{m_{33}} \\ \dot{q}_e = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} uw - \frac{M_q}{m_{55}} q - \frac{M_{q|q|}}{m_{55}} q|q| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} - \dot{q}_d + \frac{\tau_q (t - T_2')}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \omega_q \\ \dot{r}_e = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} uv - \frac{N_r}{m_{66}} r - \frac{N_{r|r|}}{m_{66}} r|r| - \dot{r}_d + \frac{\tau_r (t - T_3')}{m_{66}} + \frac{1}{m_{66}} \omega_r \end{cases}$$

为便于推导,轨迹跟踪位置误差方程写成如下矢量形式:

$$\mathbf{P}_e(t) = \mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_d(t) = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix}$$

定义欠驱动UUV的线速度误差 v_e 为位置控制系统的虚拟控制输入,则有:

$$v_e(t) = v(t) - v_d(t) = \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ w_e \end{bmatrix}$$

$$\dot{P}_e = \dot{P} - \dot{P}_d = S(\theta, \psi)v_e + (S(\theta, \psi) - S(\theta_d, \psi_d))v_d$$

$$S(\theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\sin\psi & \cos\psi \sin\theta \\ \sin\psi \cos\theta & \cos\psi & \sin\psi \sin\theta \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

其中, $v_d = [u_d \ v_d \ w_d]^T$; $S(\theta, \psi)$ 为忽略UUV横倾运动后的刚体坐标系到固定坐标系的旋转变换矩阵;

步骤3: 根据滑模变结构控制思想, 设计一阶积分滑模面, 使得跟踪位置误差 $P_e(t)$ 收敛至零; 选择欠驱动UUV的线速度误差 v_e 为运动学子系统的虚拟控制输入, 并计算出跟踪速度误差的期望控制律 α_v ; 定义虚拟控制误差 e , 将欠驱动UUV轨迹跟踪时滞控制系统描述为由运动学和动力学子系统组成的级联系统, 将轨迹跟踪位置误差镇定转移到对虚拟控制误差的镇定上;

为了实现轨迹跟踪的目标, 设计如下的一阶非线性滑模面, 使得位置误差 $P_e(t)$ 收敛至零:

$$S_0(t) = P_e(t) + \lambda_0 \int_0^t \text{sig}^\alpha(P_e(l)) dl - P_e(0)$$

式中, $S_0(t) = [S_{01}(t), S_{02}(t), S_{03}(t)]^T$ 为由三个位置误差对应的一阶非线性滑模面组成的向量; $\lambda_0 = \text{diag}(\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03})$ 为由三个一阶滑模面的积分系数组成的对角系数阵, 并且满足 $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03} > 0$; $\text{sig}^\alpha(P_e) = [|x_e|^{\alpha_1} \text{sgn}(x_e), |y_e|^{\alpha_2} \text{sgn}(y_e), |z_e|^{\alpha_3} \text{sgn}(z_e)]^T$, 其中 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in (0, 1)$, 并且具有性质 $S_0(0) = 0$, 因此所设计的滑模面初始即在滑模面上, 直接进入滑模段;

对 $S_0(t)$ 求关于时间的微分, 可得:

$$\dot{S}_0(t) = \dot{P}_e(t) + \lambda_0 \text{sig}^\alpha(P_e(t))$$

令 $\dot{S}_0(t) = 0$, 则有:

$$\dot{P}_e(t) = -\lambda_0 \text{sig}^\alpha(P_e(t))$$

将上式展开, 即:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{z}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{01} \text{sig}^{\alpha_1}(x_e) \\ -\lambda_{02} \text{sig}^{\alpha_2}(y_e) \\ -\lambda_{03} \text{sig}^{\alpha_3}(z_e) \end{bmatrix}$$

位置误差系统的虚拟控制输入 v_e 的期望控制律为:

$$\alpha_v = -S(\theta, \psi)^T \lambda_0 \text{sig}^\alpha(P_e(t)) - S(\theta, \psi)^T (S(\theta, \psi) - S(\theta_d, \psi_d)) v_d$$

式中: $\alpha_v = [\alpha_u, \alpha_v, \alpha_w]^T$, 分别由对应的线速度 $v_e = [u_e, v_e, w_e]^T$ 的期望控制律组成; 期望控制律 α_v 可以消除位置误差, 使 P_e 在有限时间内收敛至零的时间分别为:

$$t_{c1} = \frac{|x_e(0)|^{\alpha_1}}{\lambda_{01}(1-\alpha_1)}, t_{c2} = \frac{|y_e(0)|^{\alpha_2}}{\lambda_{02}(1-\alpha_2)}, t_{c3} = \frac{|z_e(0)|^{\alpha_3}}{\lambda_{03}(1-\alpha_3)}$$

定义虚拟控制误差为：

$$\mathbf{e} = \mathbf{v}_e - \boldsymbol{\alpha}_v = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e - \alpha_u \\ v_e - \alpha_v \\ w_e - \alpha_w \end{bmatrix}$$

对e进行微分可得：

$$\begin{cases} \dot{e}_u = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{m_{33}}{m_{11}}wq - \frac{X_u}{m_{11}}u - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}}u|u| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \frac{1}{m_{11}}\omega_u + \frac{\tau_u(t-T_1)}{m_{11}} \\ \dot{e}_v = -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{Y_v}{m_{22}}v - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}}v|v| - \dot{v}_d - \dot{\alpha}_v + \frac{\omega_v}{m_{22}} \\ \dot{e}_w = \frac{m_{11}}{m_{33}}uq - \frac{Z_w}{m_{33}}w - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}}w|w| - \dot{w}_d - \dot{\alpha}_w + \frac{\omega_w}{m_{33}} \end{cases}$$

$$\dot{\mathbf{P}}_e = -\lambda_0 \mathbf{sig}^a(\mathbf{P}_e) + \mathbf{S}(\theta, \psi) \mathbf{e} = \mathbf{f}_1(t, \mathbf{P}_e) + \mathbf{g}(t, \mathbf{P}_e, \mathbf{e})$$

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}_2(t, \mathbf{e})$$

因此欠驱动UUV轨迹跟踪时滞控制系统可以由如下两个子系统级联表示：

$$\begin{cases} \Sigma_1 : \dot{\mathbf{P}}_e = \mathbf{f}_1(t, \mathbf{P}_e) + \mathbf{g}(t, \mathbf{P}_e, \mathbf{e}) \\ \Sigma_2 : \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}_2(t, \mathbf{e}) \end{cases}$$

步骤4：基于级联系统控制思想，针对外界未知有界干扰和参数摄动，计算消除虚拟控制误差e的积分时滞滑模纵向、艏向、纵倾控制律 τ_u 、 τ_r 、 τ_q ；

步骤4.1：针对纵向虚拟控制误差，定义如下一阶非线性滑模平面：

$$S_1 = e_u + \lambda_1 \int_0^t e_u(l) dl, \lambda_1 > 0$$

$$\dot{S}_1 = \dot{e}_u + \lambda_1 e_u$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 = & \frac{m_{22}}{m_{11}}v(t-T)r(t-T) - \frac{m_{33}}{m_{11}}w(t-T)q(t-T) - \frac{X_u}{m_{11}}u(t-T) \\ & - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}}u(t-T)|u(t-T)| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \frac{\tau_u}{m_{11}} + \lambda_1 e_u + \omega_1 \end{aligned}$$

令：

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{eq} = & \frac{\hat{m}_{22}}{\hat{m}_{11}}v(t-T)r(t-T) - \frac{\hat{m}_{33}}{\hat{m}_{11}}w(t-T)q(t-T) - \frac{\hat{X}_u}{\hat{m}_{11}}u(t-T) \\ & - \frac{\hat{X}_{u|u|}}{\hat{m}_{11}}u(t-T)|u(t-T)| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \lambda_1 e_u \end{aligned}$$

式中，“ $\hat{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的标称值，可以通过约束船模试验、自航船模试验以及

实船试验测定;“~”表示模型不确定参数的上界,并且满足如下边界条件:

$$|m_{11} - \hat{m}_{11}| \leq \tilde{m}_{11}, |m_{22} - \hat{m}_{22}| \leq \tilde{m}_{22}, |m_{33} - \hat{m}_{33}| \leq \tilde{m}_{33}, |X_u - \hat{X}_u| \leq \tilde{X}_u, |X_{|u|} - \hat{X}_{|u|}| \leq \tilde{X}_{|u|}$$

$\hat{\tau}_{eq}$ 为三维轨迹跟踪纵向速度控制器的等效控制律,选取如下饱和函数来削弱滑动模态中符号函数引起的抖振:

$$sat(S_i/\Delta_i) = \begin{cases} 1 & , S_i > \Delta_i \\ S_i/\Delta_i & , |S_i/\Delta_i| \leq 1 \\ -1 & , S_i < -\Delta_i \end{cases}$$

式中 Δ_i 选为较小的正值,定义了一个 S_i 周围厚度任意小的边界层;由于子系统 Σ_2 模型受参数不确定性的约束,设计如下的等速趋近律来消除这种负面影响:

$$\eta_1 = \frac{\tilde{m}_{22}}{\tilde{m}_{11}} |v(t-T)r(t-T)| + \frac{\tilde{m}_{33}}{\tilde{m}_{11}} |w(t-T)q(t-T)| + \frac{\tilde{X}_u}{\tilde{m}_{11}} |u(t-T)| + \frac{\tilde{X}_{|u|}}{\tilde{m}_{11}} u^2(t-T) + |\dot{u}_d| + |\dot{\alpha}_u| + \lambda_1 |u_e| + \rho_1$$

式中, ρ_1 为待确定正常数;

为消除时滞、参数不确定以及外界干扰的影响,最终设计纵向控制律 τ_u 为:

$$\tau_u = m_{11} \left[-\hat{\tau}_{eq} - \eta_1 sat(S_1/\Delta_1) - K_1 S_1 - H_1 S_1(t-T_m) \right]$$

式中, $\eta_1 \geq \xi_1$; K_1 为正常数; H_1 为待确定增益矩阵系数;

步骤4.2: 针对艏向虚拟控制误差,定义如下二阶非线性滑模平面:

$$S_2 = \dot{e}_v + 2\lambda_2 e_v + \lambda_2^2 \int_0^t e_v(l) dl, \lambda_2 > 0$$

$$\dot{S}_2 = \ddot{e}_v + 2\lambda_2 \dot{e}_v + \lambda_2^2 e_v$$

$$\begin{aligned} \ddot{e}_v &= -\frac{m_{11}}{m_{22}} (\dot{u}r(t-T) - u(t-T)\dot{r}) - \frac{Y_v}{m_{22}} \dot{v} \\ &\quad - 2\frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} \dot{v} |v(t-T)| - \ddot{v}_d - \ddot{\alpha}_v + \frac{1}{m_{22}} \dot{\omega}_v \\ &= \frac{m_{22}(\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11}u}{m_{22}m_{66}} \left((m_{11} - m_{22})u(t-T)v(t-T) - N_r r(t-T) \right) \\ &\quad - \frac{m_{11}}{m_{22}} \dot{u}r(t-T) - \frac{Y_v}{m_{22}} \dot{v} - 2\frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} \dot{v} |v(t-T)| - \ddot{v}_d + \frac{1}{m_{22}} \dot{\omega}_v - \Theta_r \end{aligned}$$

其中, $\Theta_r = \ddot{\alpha}_v + (\alpha_u + \alpha_w \tan \theta)\dot{r}$; $\dot{S}_2 = \frac{\beta_r}{m_{22}m_{66}} \tau_r - \frac{\kappa_r}{m_{22}m_{66}} + \omega_2$; ω_2 为有界环境干扰,选取

定常上界为 ξ_2 ;

$$\beta_r = m_{22}(\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11}(e_u + \alpha_u + u_d)$$

$$\begin{aligned} \kappa_r = & \left(m_{22} (\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11} (e_u + \alpha_u + u_d) \right) \left(\begin{aligned} & \left((m_{11} - m_{22}) u(t-T) v(t-T) \right) \\ & \left(-N_r r(t-T) - N_{r|r} r(t-T) |r(t-T)| \right) \end{aligned} \right) \\ & + m_{11} m_{66} \dot{u} r(t-T) + m_{66} \dot{v} - 2m_{66} \dot{v} |v(t-T)| + m_{22} m_{66} (\ddot{v}_d + \Theta_r - 2\lambda_2 \dot{e}_v - \lambda_2^2 e_v) \end{aligned}$$

设计如下的等速趋近律来消除子系统 Σ_2 参数不确定带来的负面影响:

$$\eta_2 = \frac{\tilde{\kappa}_r}{\tilde{m}_{22} \tilde{m}_{66}} + \rho_2$$

式中, ρ_2 为待确定正常数, 所涉及到的不确定模型参数满足如下边界条件:

$$|m_{66} - \hat{m}_{66}| \leq \tilde{m}_{66}, |Y_v - \hat{Y}_v| \leq \tilde{Y}_v, |Y_{v|v|} - \hat{Y}_{v|v|}| \leq \tilde{Y}_{v|v|}, |N_v - \hat{N}_v| \leq \tilde{N}_v, |N_{v|v|} - \hat{N}_{v|v|}| \leq \tilde{N}_{v|v|}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\kappa}_r = & \left(\tilde{m}_{22} (|\alpha_u| + |\alpha_w| \tan \theta) + \tilde{m}_{11} (|e_u| + |\alpha_u| + |u_d|) \right) \left(\begin{aligned} & \left((\tilde{m}_{11} + \tilde{m}_{22}) |u(t-T) v(t-T)| \right) \\ & \left(+ \tilde{N}_r |r(t-T)| + \tilde{N}_{r|r} r^2(t-T) \right) \end{aligned} \right) + \\ & \tilde{m}_{11} \tilde{m}_{66} |\dot{u} r(t-T)| + \tilde{m}_{66} |\dot{v}| + 2\tilde{m}_{66} |\dot{v} v(t-T)| + \tilde{m}_{22} \tilde{m}_{66} (|\ddot{v}_d| + |\Theta_r| + 2\lambda_2 |\dot{e}_v| + \lambda_2^2 |e_v|) \end{aligned}$$

最终设计艏向控制律 τ_r 为:

$$\tau_r = \frac{\hat{m}_{22} \hat{m}_{66}}{\hat{\beta}_r} \left[\frac{\hat{\kappa}_r}{\hat{m}_{22} \hat{m}_{66}} - \eta_2 \text{sat}(S_2 / \Delta_2) - K_2 S_2 - H_2 S_2 (t - T_m) \right]$$

式中, $\eta_2 \geq \xi_2$; K_2 为正常数; H_2 为待确定增益矩阵系数;

步骤4.3: 针对纵倾虚拟控制误差, 定义如下二阶非线性滑模平面:

$$S_3 = \dot{e}_w + 2\lambda_3 e_w + \lambda_3^2 \int_0^t e_w(l) dl, \lambda_3 > 0$$

$$\dot{S}_3 = \ddot{e}_w + 2\lambda_3 \dot{e}_w + \lambda_3^2 e_w$$

$$\dot{S}_3 = \frac{\beta_q}{m_{33} m_{55}} \tau_q - \frac{\kappa_q}{m_{33} m_{55}} + \omega_3$$

式中, ω_3 为有界环境干扰, 选取定常上界为 ξ_3 ;

$$\beta_q = m_{33} \alpha_u - m_{11} (e_u + \alpha_u + u_d)$$

$$\begin{aligned} \kappa_q = & \left(m_{11} (e_u + \alpha_u + u_d) - m_{33} \alpha_u \right) \left(\begin{aligned} & \left((m_{33} - m_{11}) u w - M_q q \right) \\ & \left(-M_{q|q} q |q| - \overline{BGM}_L \sin \theta \right) \end{aligned} \right) + m_{11} m_{55} \dot{u} q \\ & - m_{55} Z_w \dot{w} - 2Z_{w|w|} \dot{w} |w| - m_{33} m_{55} (\ddot{w}_d + \Theta_q - 2\lambda_3 \dot{e}_w - \lambda_3^2 e_w) \end{aligned}$$

其中, $\Theta_q = \ddot{\alpha}_w + \dot{q} \alpha_u$; 设计如下的等速趋近律来消除子系统 Σ_2 参数不确定带来的负面影响:

$$\eta_3 = \frac{\tilde{\kappa}_q}{\tilde{m}_{33} \tilde{m}_{55}} + \rho_3$$

式中, ρ_3 为待确定正常数, 所涉及到的不确定模型参数满足如下边界条件:

$$|m_{55} - \hat{m}_{55}| \leq \tilde{m}_{55}, |Z_w - \hat{Z}_w| \leq \tilde{Z}_w, |Z_{w|w|} - \hat{Z}_{w|w|}| \leq \tilde{Z}_{w|w|}, |M_q - \hat{M}_q| \leq \tilde{M}_q, |M_{q|q|} - \hat{M}_{q|q|}| \leq \tilde{M}_{q|q|}$$

$$\tilde{\kappa}_q = \begin{pmatrix} \tilde{m}_{11} (|e_u| + |\alpha_u| + |u_d|) \\ + \tilde{m}_{33} |\alpha_u| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\tilde{m}_{33} - \tilde{m}_{11}) |uw| + \tilde{M}_q |q| \\ + \tilde{M}_{q|q|} q^2 + \tilde{BGM}_L \sin \theta \end{pmatrix} + \tilde{m}_{11} \tilde{m}_{55} |\dot{u}q| + \\ \tilde{m}_{55} \tilde{Z}_w |\dot{w}| + 2\tilde{Z}_{w|w|} |\dot{w}w| + \tilde{m}_{33} \tilde{m}_{55} (|\ddot{w}_d| + \tilde{\Theta}_q + 2\lambda_3 |\dot{e}_w| + \lambda_3^2 |e_w|)$$

最终设计纵倾控制律 τ_q 为:

$$\tau_q = \frac{\hat{m}_{33} \hat{m}_{55}}{\hat{\beta}_q} \left[\frac{\hat{\kappa}_q}{\hat{m}_{33} \hat{m}_{55}} - \eta_3 \text{sat}(S_3 / \Delta_3) - K_3 S_3 - H_3 S_3 (t - T_m) \right]$$

式中, $\eta_3 \geq \xi_3$; K_3 为正常数; H_3 为待确定增益矩阵系数;

步骤5: 将纵向、艏向和纵倾控制律输入回UUV模型, 调整UUV的纵向速度、艏向角速度和纵倾角速度, 完成UUV轨迹跟踪滑模控制过程。

一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于水下无人航行器控制研究领域,具体涉及一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法。

背景技术

[0002] 水下无人航行器(Unmanned Underwater Vehicle,UUV)的空间轨迹跟踪控制能力是实现海洋勘探的核心能力之一。本发明针对一类欠驱动UUV系统开展设计有如下两个原因:(1)欠驱动设计可以使UUV硬件系统得到大幅简化;(2)若全驱动UUV的部分辅助推进装置出现故障,则该系统将表现出欠驱动特性,常规轨迹跟踪控制方法无法满足控制需求。综上,对于欠驱动UUV空间轨迹跟踪控制方法的研究不仅具有理论价值,而且符合实际控制需求。

[0003] 具有输入时滞的欠驱动UUV运动控制系统是一类典型的时滞强非线性系统,时滞特性和非线性约束的相互耦合给系统的控制研究带来了挑战。目前,根据参考文献可知,针对欠驱动UUV的轨迹跟踪控制方法大都是基于适用于无时滞系统的Lyapunov稳定性理论展开。一方面,工程实际的应用中,UUV的推进器、舵机等执行机构存在的时延问题将导致控制力和力矩输出延迟,将使系统超调增大、控制效果变差,甚至导致系统发散不稳定。另一方面,输入时滞的引入导致系统特征方程具有无穷多个特征根,成为无穷维系统,此时基于传统Lyapunov稳定性理论的轨迹跟踪控制策略不再适用。另外,欠驱动UUV轨迹跟踪控制还受到外界干扰的影响。针对以上问题,本发明提出一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法。该方法将系统转换为由运动学子系统和动力学子系统组成的级联系统,分别针对级联子系统的轨迹跟踪位置和速度误差设计了一阶和二阶的积分时滞滑模控制律,在滑模控制中引入等速趋近律来改善到达段的控制品质并抵消模型不确定性对系统的影响,其中,等速趋近律增益系数与模型参数摄动的上确界有相关,并基于Lyapunov-Krasovskii泛函给出了LMI形式的系统稳定性条件。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供可以根据未知有界时滞选取参数的积分滑模策略来控制欠驱动的UUV轨迹跟踪的一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法。

[0005] 本发明通过如下技术方案实现:包括以下步骤:

[0006] 步骤1:UUV通过所搭载的导航设备和传感器采集数据,获得当前的位置信息、姿态信息和速度信息,确定UUV的期望位置信息;

[0007] 步骤2:将六自由度的UUV模型简化为欠驱动UUV五自由度时滞运动模型,对期望轨迹在当前时刻下的位置姿态信息进行求导,得到跟踪位置误差方程、跟踪姿态误差方程和跟踪速度误差方程;

[0008] 步骤3:根据滑模变结构控制思想,设计一阶积分滑模面,使得跟踪位置误差 $P_e(t)$ 收敛至零;选择欠驱动UUV的线速度误差 v_e 为运动学子系统的虚拟控制输入,并计算出跟踪

速度误差的期望控制律 α_v ;定义虚拟控制误差 e ,将欠驱动UUV轨迹跟踪时滞控制系统描述为由运动学和动力学子系统组成的级联系统,将轨迹跟踪位置误差镇定转移到对虚拟控制误差的镇定上;

[0009] 步骤4:基于级联系统控制思想,针对外界未知有界干扰和参数摄动,计算消除虚拟控制误差 e 的积分时滞滑模纵向、艏向、纵倾控制律 τ_u, τ_r, τ_q ;

[0010] 步骤5:将纵向、艏向和纵倾控制律输入回UUV模型,调整UUV的纵向速度、艏向角速度和纵倾角速度,完成UUV轨迹跟踪滑模控制过程。

[0011] 本发明还可以包括:

[0012] 所述的步骤1中UUV当前的位置信息为:

$$[0013] \quad X(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$$

[0014] $x(t), y(t), z(t)$ 为 t 时刻固定坐标系下UUV在 $0x$ 轴, $0y$ 轴, $0z$ 轴的位置信息;

[0015] UUV当前的姿态信息为:

$$[0016] \quad [\theta(t), \psi(t)]^T$$

[0017] $\theta(t)$ 为 t 时刻UUV的纵倾角; $\psi(t)$ 为 t 时刻UUV的艏向角;

[0018] UUV当前的速度信息为:

$$[0019] \quad V(t) = [u(t), v(t), w(t), q(t), r(t)]^T$$

[0020] $u(t)$ 为 t 时刻UUV的纵向速度; $v(t)$ 为 t 时刻UUV的横向速度; $w(t)$ 为 t 时刻UUV的垂直甲板方向速度; $q(t)$ 为 t 时刻UUV的纵倾角速度; $r(t)$ 为 t 时刻UUV的偏航角速度;

[0021] UUV的期望位置信息为:

$$[0022] \quad P_d(t) = [x_d(t), y_d(t), z_d(t)]^T$$

[0023] $x_d(t), y_d(t), z_d(t)$ 分别为 t 时刻固定坐标系下UUV在 $0x$ 轴, $0y$ 轴及 $0z$ 轴的期望位置信息。

[0024] 所述的步骤2中欠驱动UUV五自由度时滞运动模型为:

$$[0025] \quad \begin{cases} \dot{x}_d = u_d \cos(\psi_d) \cos(\theta_d) - v_d \sin(\psi_d) + w_d \cos(\psi_d) \sin(\theta_d) \\ \dot{y}_d = u_d \sin(\psi_d) \cos(\theta_d) + v_d \cos(\psi_d) + w_d \sin(\psi_d) \sin(\theta_d) \\ \dot{z}_d = -u_d \sin(\theta_d) + w_d \cos(\theta_d) \\ \dot{\theta}_d = q_d \\ \dot{\psi}_d = r_d / \cos(\theta_d) \end{cases}$$

$$[0026] \quad \begin{cases} \dot{u}_d = \frac{m_{22}}{m_{11}} v_d r_d - \frac{m_{33}}{m_{11}} w_d q_d - \frac{X_u}{m_{11}} u_d - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u_d |u_d| + \frac{1}{m_{11}} \tau_{ud} \\ \dot{v}_d = -\frac{m_{11}}{m_{22}} u_d r_d - \frac{Y_v}{m_{22}} v_d - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v_d |v_d| \\ \dot{w}_d = \frac{m_{11}}{m_{33}} u_d q_d - \frac{Z_w}{m_{33}} w_d - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}} w_d |w_d| \\ \dot{q}_d = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} u_d w_d - \frac{M_q}{m_{55}} q_d - \frac{M_{q|q|}}{m_{55}} q_d |q_d| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \tau_{qd} \\ \dot{r}_d = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} u_d v_d - \frac{N_r}{m_{66}} r_d - \frac{N_{r|r|}}{m_{66}} r_d |r_d| + \frac{1}{m_{66}} \tau_{rd} \end{cases}$$

[0027] 其中 x_d, y_d, z_d 分别为固定坐标系下UUV在 $0x$ 轴, $0y$ 轴, $0z$ 轴的期望位置; θ_d, ψ_d 分别为UUV的期望纵倾角与期望艏向角; u_d, v_d, w_d, q_d, r_d 分别为UUV的期望纵向速度、期望横向速度、期望垂直甲板方向速度、期望纵倾角速度、期望偏航角速度; $\tau_{ud}, \tau_{qd}, \tau_{rd}$ 分别为主推器、垂直舵、水平舵的期望控制向量; $m_{11}, m_{22}, m_{33}, m_{55}$ 和 m_{66} 表示包括附加质量在内的惯性系数; $X_u, X_{u|u|}, Y_v, Y_{v|v|}, Z_w, Z_{w|w|}, M_q, M_{q|q|}, N_r, N_{r|r|}$ 为不同阶数的水动力阻尼系数; B 为欠驱动UUV所受浮力; \overline{GM}_L 为纵向稳心高;

[0028] 所述的跟踪位置误差方程为:

$$[0029] \quad \begin{cases} \dot{x}_e = u_e \cos \psi \cos \theta - v_e \cos \psi \sin \theta + u_d (\cos \psi \cos \theta - \cos \psi_d \cos \theta_d) \\ \quad - v_d (\sin \psi - \sin \psi_d) + w_d (\cos \psi \sin \theta - \cos \psi_d \sin \theta_d) \\ \dot{y}_e = u_e \sin \psi \cos \theta + v_e \cos \psi + w_e \sin \psi \sin \theta + u_d (\sin \psi \cos \theta - \sin \psi_d \cos \theta_d) \\ \quad - v_d (\cos \psi - \cos \psi_d) + w_d (\sin \psi \sin \theta - \sin \psi_d \sin \theta_d) \\ \dot{z}_e = -u_e \sin \theta + w_e \cos \theta - u_d (\sin \theta - \sin \theta_d) + w_d (\cos \theta - \cos \theta_d) \end{cases}$$

[0030] 跟踪位置误差方程的矢量形式 $P_e(t)$ 为:

$$[0031] \quad P_e(t) = P(t) - P_d(t) = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix}$$

[0032] 所述的跟踪姿态误差方程为:

$$[0033] \quad \begin{cases} \dot{\theta}_e = q_e \\ \dot{\psi}_e = \frac{r}{\cos \theta} - \frac{r_d}{\cos \theta_d} \end{cases}$$

[0034] 所述的跟踪速度误差方程为:

$$[0035] \quad \begin{cases} \dot{u}_e = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{m_{33}}{m_{11}} wq - \frac{X_u}{m_{11}} u - \frac{X_{u|u}}{m_{11}} u|u| - \dot{u}_d + \frac{1}{m_{11}} \omega_u + \frac{\tau_u (t - T_1')}{m_{11}} \\ \dot{v}_e = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{Y_v}{m_{22}} v - \frac{Y_{v|v}}{m_{22}} v|v| - \dot{v}_d + \frac{\omega_v}{m_{22}} \\ \dot{w}_e = \frac{m_{11}}{m_{33}} uq - \frac{Z_w}{m_{33}} w - \frac{Z_{w|w}}{m_{33}} w|w| - \dot{w}_d + \frac{\omega_w}{m_{33}} \end{cases}$$

$$[0036] \quad \begin{cases} \dot{q}_e = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} uw - \frac{M_q}{m_{55}} q - \frac{M_{q|q}}{m_{55}} q|q| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} - \dot{q}_d + \frac{\tau_q (t - T_2')}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \omega_q \\ \dot{r}_e = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} uv - \frac{N_r}{m_{66}} r - \frac{N_{r|r}}{m_{66}} r|r| - \dot{r}_d + \frac{\tau_r (t - T_3')}{m_{66}} + \frac{1}{m_{66}} \omega_r \end{cases}$$

[0037] 其中 $\omega = [\omega_u, \omega_v, \omega_w, \omega_q, \omega_r]^T$ 为环境未知有界干扰; $T' = [T_1', 0, 0, T_2', T_3']^T$ 为刚体坐标系下纵向、纵倾、艏向上执行机构带来的输入时滞, 且该时滞为未知有界时滞。

[0038] 所述的步骤3中的一阶积分滑模面为:

$$[0039] \quad S_0(t) = P_e(t) + \lambda_0 \int_0^t \mathbf{sig}^\alpha(P_e(l)) dl - P_e(0)$$

[0040] 其中:

$$[0041] \quad \mathbf{sig}^\alpha(P_e) = \left[|x_e|^{\alpha_1} \operatorname{sgn}(x_e), |y_e|^{\alpha_2} \operatorname{sgn}(y_e), |z_e|^{\alpha_3} \operatorname{sgn}(z_e) \right]^T$$

[0042] $S_0(t) = [S_{01}(t), S_{02}(t), S_{03}(t)]^T$ 为由三个位置误差对应的一阶非线性滑模面组成的向量, 且 $S_0(0) = 0$; $\lambda_0 = \operatorname{diag}(\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03})$ 为由三个一阶滑模面的积分系数组成的对角系数阵, 并且满足 $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03} > 0$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in (0, 1)$;

[0043] 所述的欠驱动UUV的线速度误差 v_e 为:

$$[0044] \quad v_e(t) = v(t) - v_d(t) = \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ w_e \end{bmatrix}$$

$$[0045] \quad v_d = [u_d \ v_d \ w_d]^T$$

[0046] 所述的跟踪速度误差的期望控制律 α_v 为:

$$[0047] \quad \alpha_v = -S(\theta, \psi)^T \lambda_0 \mathbf{sig}^\alpha(P_e(t)) - S(\theta, \psi)^T (S(\theta, \psi) - S(\theta_d, \psi_d)) v_d$$

[0048] 其中, $\alpha_v = [\alpha_u, \alpha_v, \alpha_w]^T$, 分别由对应的线速度 $v_e = [u_e, v_e, w_e]^T$ 的期望控制律组成;

$$\mathbf{S}(\theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \text{为忽略UUV横倾运动后的刚体坐标系到}$$

固定坐标系的旋转变换矩阵；

[0049] 所述的虚拟控制误差 e 为：

$$[0050] \quad \mathbf{e} = \mathbf{v}_e - \boldsymbol{\alpha}_v = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e - \alpha_u \\ v_e - \alpha_v \\ w_e - \alpha_w \end{bmatrix}。$$

[0051] 所述的步骤4中纵向控制律 τ_u 为：

$$[0052] \quad \tau_u = m_{11} \left[-\hat{\tau}_{eq} - \eta_1 \text{sat}(S_1/\Delta_1) - K_1 S_1 - H_1 S_1 (t - T_m) \right]$$

[0053] 其中：

$$[0054] \quad \hat{\tau}_{eq} = \frac{\hat{m}_{22}}{\hat{m}_{11}} v(t-T)r(t-T) - \frac{\hat{m}_{33}}{\hat{m}_{11}} w(t-T)q(t-T) - \frac{\hat{X}_u}{\hat{m}_{11}} u(t-T) - \frac{\hat{X}_{u|u|}}{\hat{m}_{11}} u(t-T)|u(t-T)| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \lambda_1 u_e$$

$$[0055] \quad \eta_1 = \frac{\tilde{m}_{22}}{\tilde{m}_{11}} |v(t-T)r(t-T)| + \frac{\tilde{m}_{33}}{\tilde{m}_{11}} |w(t-T)q(t-T)| + \frac{\tilde{X}_u}{\tilde{m}_{11}} |u(t-T)| + \frac{\tilde{X}_{u|u|}}{\tilde{m}_{11}} u^2(t-T) + |\dot{u}_d| + |\dot{\alpha}_u| + \lambda_1 |u_e| + \rho_1$$

$$[0056] \quad \text{sat}(S_i/\Delta_i) = \begin{cases} 1 & , S_i > \Delta_i \\ S_i/\Delta_i & , |S_i/\Delta_i| \leq 1 \\ -1 & , S_i < -\Delta_i \end{cases}$$

$$[0057] \quad S_1 = e_u + \lambda_1 \int_0^t e_u(l) dl, \lambda_1 > 0$$

[0058] 其中 \hat{m}_{11} 、 \hat{m}_{22} 、 \hat{m}_{33} 、 \hat{X}_u 、 $\hat{X}_{u|u|}$ 中符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的标称值，通过约束船模试验、自航船模试验以及实船试验等测定； \tilde{m}_{11} 、 \tilde{m}_{22} 、 \tilde{m}_{33} 、 \tilde{X}_u 、 $\tilde{X}_{u|u|}$ 中符号“ $\tilde{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的上界，并且满足如下边界条件：

$$[0059] \quad |m_{11} - \hat{m}_{11}| \leq \tilde{m}_{11}, |m_{22} - \hat{m}_{22}| \leq \tilde{m}_{22}, |m_{33} - \hat{m}_{33}| \leq \tilde{m}_{33}, |X_u - \hat{X}_u| \leq \tilde{X}_u, |X_{u|u|} - \hat{X}_{u|u|}| \leq \tilde{X}_{u|u|};$$

[0060] $\hat{\tau}_{eq}$ 为三维轨迹跟踪纵向速度控制器的等效控制律; Δ_i 为 S_i 周围厚度任意小的边界层, 取正值; ρ_1 为待确定正常数; K_1 为正常数; H_1 为待确定增益矩阵系数。

[0061] 所述的步骤4中艏向控制律 τ_r 为:

$$[0062] \quad \tau_r = \frac{\hat{m}_{22}\hat{m}_{66}}{\hat{\beta}_r} \left[\frac{\hat{\kappa}_r}{\hat{m}_{22}\hat{m}_{66}} - \eta_2 \text{sat}(S_2/\Delta_2) - K_2 S_2 - H_2 S_2 (t - T_m) \right]$$

[0063] 其中:

$$[0064] \quad \hat{\beta}_r = \hat{m}_{22} (\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - \hat{m}_{11} (e_u + \alpha_u + u_d)$$

$$[0065] \quad \kappa_r = (m_{22} (\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11} (e_u + \alpha_u + u_d)) \left(\left(\begin{array}{l} (m_{11} - m_{22})u(t-T)v(t-T) \\ -N_r r(t-T) - N_{r|r} r(t-T) |r(t-T)| \end{array} \right) \right) \\ + m_{11} m_{66} \dot{u} r(t-T) + m_{66} \dot{v} - 2m_{66} \dot{v} |v(t-T)| + m_{22} m_{66} (\dot{v}_d + \Theta_r - 2\lambda_2 \dot{e}_v - \lambda_2^2 e_v)$$

$$[0066] \quad \tilde{\kappa}_r = (\tilde{m}_{22} (|\alpha_u| + |\alpha_w \tan \theta|) + \tilde{m}_{11} (|e_u| + |\alpha_u| + |u_d|)) \left(\left(\begin{array}{l} (\tilde{m}_{11} + \tilde{m}_{22}) |u(t-T)v(t-T)| \\ + \tilde{N}_r |r(t-T)| + \tilde{N}_{r|r} r^2(t-T) \end{array} \right) \right) + \\ \tilde{m}_{11} \tilde{m}_{66} |\dot{u} r(t-T)| + \tilde{m}_{66} |\dot{v}| + 2\tilde{m}_{66} |\dot{v} v(t-T)| + \tilde{m}_{22} \tilde{m}_{66} (|\dot{v}_d| + |\Theta_r| + 2\lambda_2 |\dot{e}_v| + \lambda_2^2 |e_v|)$$

$$[0067] \quad \Theta_r = \ddot{\alpha}_v + (\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) \dot{r}$$

$$[0068] \quad \eta_2 = \frac{\tilde{\kappa}_r}{\tilde{m}_{22} \tilde{m}_{66}} + \rho_2$$

$$[0069] \quad S_2 = \dot{e}_v + 2\lambda_2 e_v + \lambda_2^2 \int_0^t e_v(l) dl, \quad \lambda_2 > 0$$

[0070] 其中, ρ_2 为待确定正常数; K_2 为正常数; H_2 为待确定增益矩阵系数;

[0071] \hat{m}_{66} 、 \hat{Y}_v 、 $\hat{Y}_{v|v}$ 、 \hat{N}_v 、 $\hat{N}_{v|v}$ 、 $\hat{\kappa}_r$ 中符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的标称值, 通过约束船模试验、自航船模试验以及实船试验等测定; \tilde{m}_{66} 、 \tilde{Y}_v 、 $\tilde{Y}_{v|v}$ 、 \tilde{N}_v 、 $\tilde{N}_{v|v}$ 、 $\tilde{\kappa}_r$ 中符号“ $\tilde{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的上界, 并且满足如下边界条件:

$$[0072] \quad |m_{66} - \hat{m}_{66}| \leq \tilde{m}_{66}, |Y_v - \hat{Y}_v| \leq \tilde{Y}_v, |Y_{v|v} - \hat{Y}_{v|v}| \leq \tilde{Y}_{v|v}, |N_v - \hat{N}_v| \leq \tilde{N}_v, |N_{v|v} - \hat{N}_{v|v}| \leq \tilde{N}_{v|v}$$

$$[0073] \quad |\kappa_r - \hat{\kappa}_r| \leq \tilde{\kappa}_r.$$

[0074] 所述的步骤4中纵倾控制律 τ_q 为:

$$[0075] \quad \tau_q = \frac{\hat{m}_{33}\hat{m}_{55}}{\hat{\beta}_q} \left[\frac{\hat{\kappa}_q}{\hat{m}_{33}\hat{m}_{55}} - \eta_3 \text{sat}(S_3/\Delta_3) - K_3 S_3 - H_3 S_3 (t - T_m) \right]$$

[0076] 其中:

$$[0077] \quad \hat{\beta}_q = \hat{m}_{33}\alpha_u - \hat{m}_{11}(e_u + \alpha_u + u_d)$$

$$[0078] \quad \kappa_q = (m_{11}(e_u + \alpha_u + u_d) - m_{33}\alpha_u) \begin{pmatrix} (m_{33} - m_{11})uw - M_q q \\ -M_{q|q}q|q| - \overline{BGM}_L \sin \theta \end{pmatrix} + m_{11}m_{55}\dot{u}q \\ - m_{55}Z_w\dot{w} - 2Z_{w|w}|\dot{w}|w| - m_{33}m_{55}(\ddot{w}_d + \Theta_q - 2\lambda_3\dot{e}_w - \lambda_3^2 e_w)$$

$$[0079] \quad \tilde{\kappa}_q = \begin{pmatrix} \tilde{m}_{11}(|e_u| + |\alpha_u| + |u_d|) \\ + \tilde{m}_{33}|\alpha_u| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\tilde{m}_{33} - \tilde{m}_{11})|uw| + \tilde{M}_q|q| \\ + \tilde{M}_{q|q}q^2 + \tilde{BGM}_L \sin \theta \end{pmatrix} + \tilde{m}_{11}\tilde{m}_{55}|uq| + \\ \tilde{m}_{55}\tilde{Z}_w|\dot{w}| + 2\tilde{Z}_{w|w}|\dot{w}|w| + \tilde{m}_{33}\tilde{m}_{55}(|\dot{w}_d| + \tilde{\Theta}_q + 2\lambda_3|\dot{e}_w| + \lambda_3^2|e_w|)$$

$$[0080] \quad \Theta_q = \ddot{\alpha}_w + \dot{q}\alpha_u$$

$$[0081] \quad \eta_3 = \frac{\tilde{\kappa}_q}{\tilde{m}_{33}\tilde{m}_{55}} + \rho_3$$

$$[0082] \quad S_3 = \dot{e}_w + 2\lambda_3 e_w + \lambda_3^2 \int_0^t e_w(l)dl, \lambda_3 > 0$$

[0083] 其中, ρ_3 为待确定正常数; K_3 为正常数; H_3 为待确定增益矩阵系数;

[0084] \hat{m}_{55} 、 \hat{Z}_w 、 $\hat{Z}_{w|w}$ 、 \hat{M}_q 、 $\hat{M}_{q|q}$ 、 $\hat{\kappa}_q$ 、 $\hat{\Theta}_q$ 中符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的标称值, 通过约束船模试验、自航船模试验以及实船试验等测定;

[0085] \tilde{m}_{55} 、 \tilde{Z}_w 、 $\tilde{Z}_{w|w}$ 、 \tilde{M}_q 、 $\tilde{M}_{q|q}$ 、 $\tilde{\kappa}_q$ 、 $\tilde{\Theta}_q$ 中符号“ $\tilde{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的上界, 并且满足如下边界条件:

$$[0086] \quad |m_{55} - \hat{m}_{55}| \leq \tilde{m}_{55}, |Z_w - \hat{Z}_w| \leq \tilde{Z}_w, |Z_{w|w} - \hat{Z}_{w|w}| \leq \tilde{Z}_{w|w}, |M_q - \hat{M}_q| \leq \tilde{M}_q, |M_{q|q} - \hat{M}_{q|q}| \leq \tilde{M}_{q|q}$$

$$[0087] \quad |\kappa_q - \hat{\kappa}_q| \leq \tilde{\kappa}_q, |\Theta_q - \hat{\Theta}_q| \leq \tilde{\Theta}_q。$$

[0088] 本发明的有益效果在于:

[0089] 本发明通过建立虚拟欠驱动UUV, 将欠驱动UUV轨迹跟踪控制问题被转换成跟踪误差镇定问题, 简化了计算过程; 利用滑模控制, 提高了系统的控制性能和鲁棒性, 满足欠驱动UUV三维轨迹跟踪对位置、速度以及姿态的时间约束要求。在具有输入时滞、外界海流干扰以及模型参数摄动的情况下, 本发明能够使UUV快速且平稳地跟踪上期望轨迹, 控制性能良好。

附图说明

[0090] 图1是本发明的总体流程图;

- [0091] 图2(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV三维轨迹跟踪对比曲线；
 [0092] 图2(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV三维轨迹跟踪对比曲线；
 [0093] 图3(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV位置跟踪误差曲线；
 [0094] 图3(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV位置跟踪误差曲线；
 [0095] 图4(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪平移速度响应曲线；
 [0096] 图4(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪平移速度响应曲线；
 [0097] 图5(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV平移速度跟踪误差曲线；
 [0098] 图5(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV平移速度跟踪误差曲线；
 [0099] 图6(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV姿态角跟踪误差曲线；
 [0100] 图6(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV姿态角跟踪误差曲线；
 [0101] 图7(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪角速度响应曲线；
 [0102] 图7(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪角速度响应曲线；
 [0103] 图8(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV角速度跟踪误差曲线；
 [0104] 图8(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV角速度跟踪误差曲线；
 [0105] 图9(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV控制输入力和力矩曲线；
 [0106] 图9(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV控制输入力和力矩曲线；

具体实施方式

[0107] 下面结合附图对本发明做进一步描述。

[0108] 一种针对输入时滞的欠驱动UUV轨迹跟踪滑模控制方法,包括以下步骤:

[0109] 步骤1中UUV根据当前任务,将期望轨迹位置信息给定UUV,并通过所搭载的导航设备和传感器采集数据,获得当前的位置 $X(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$ 信息、姿态 $[\theta(t), \psi(t)]^T$ 信息、速度 $V(t) = [u(t), v(t), w(t), q(t), r(t)]^T$ 信息。

[0110] 步骤2中利用步骤1中的信息,将欠驱动UUV模型简化为UUV五自由度时滞运动模型,对期望轨迹在当前时刻下的位置姿态信息进行求导得到跟踪位姿误差和跟踪速度误差。

[0111] 所涉及的欠驱动UUV的数学模型包括运动学模型和动力学模型、跟踪位姿误差、跟踪速度误差表达式分别为:

[0112] 运动学模型:

$$[0113] \begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi \cos \theta - v \sin \psi + w \cos \psi \sin \theta \\ \dot{y} = u \sin \psi \cos \theta + v \cos \psi + w \sin \psi \sin \theta \\ \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \\ \dot{\theta} = q \\ \dot{\psi} = r / \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

$$[0114] \quad \begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{m_{33}}{m_{11}} wq - \frac{X_u}{m_{11}} u - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u|u| + \frac{\tau_u (t - T_1') + \omega_u}{m_{11}} \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{Y_v}{m_{22}} v - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v|v| + \frac{\omega_v}{m_{22}} \\ \dot{w} = \frac{m_{11}}{m_{33}} uq - \frac{Z_w}{m_{33}} w - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}} w|w| + \frac{\omega_w}{m_{33}} \\ \dot{q} = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} uw - \frac{M_q}{m_{55}} q - \frac{M_{q|q|}}{m_{55}} q|q| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} + \frac{\tau_q (t - T_2') + \omega_q}{m_{55}} \\ \dot{r} = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} uv - \frac{N_r}{m_{66}} r - \frac{N_{r|r|}}{m_{66}} r|r| + \frac{\tau_r (t - T_3') + \omega_r}{m_{66}} \end{cases} \quad (2)$$

[0115] 式中： $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ 为固定坐标系下UUV在0x轴,0y轴,0z轴的位置信息； θ 为纵倾角， ψ 为艏向角； u 为纵向速度， v 为横向速度， w 为垂直甲板方向速度； q 为纵倾角速度， r 为偏航角速度； m 为UUV总质量， I_y, I_z 分别为绕y, z轴的转动惯量， τ_u, τ_q, τ_r 分别为欠驱动UUV主推器、垂直舵、水平舵的控制向量， $m_{11} = m - X_{\ddot{u}}$ ； $m_{22} = m - Y_{\ddot{v}}$ ； $m_{33} = m - N_{\ddot{r}}$ ； $m_{55} = I_y - M_{\ddot{u}}$ ； $m_{66} = I_z - N_{\ddot{r}}$ ； $m_{11}, m_{22}, m_{33}, m_{55}, m_{66}$ 表示包括附加质量在内的惯性系数， $X_{\ddot{u}}, Y_{\ddot{v}}, N_{\ddot{r}}, M_{\ddot{u}}, N_{\ddot{r}}, X_u, X_{u|u|}, Y_v, Y_{v|v|}, Z_w, Z_{w|w|}, M_q, M_{q|q|}, N_r, N_{r|r|}$ 为不同阶数的水动力（水动力：船体、舵等与周围的水发生相互作用而受到的作用力）阻尼系数， $m_{11}, m_{22}, m_{33}, d_{11}, d_{22}, d_{33}$ 仅是为了方便观察模型，用单个字母来代替公式，并无国际标准意义。 B 为UUV所受浮力， \overline{GM}_L 为纵向稳心高， $\omega = [\omega_u, \omega_v, \omega_w, \omega_q, \omega_r]^T$ 为环境未知有界干扰， $T' = [T_1', 0, 0, T_2', T_3']^T$ 为刚体坐标系下纵向、纵倾、艏向上执行机构带来的输入时滞，该时滞为未知有界时滞。以上模型为UUV的通用简化模型。

[0116] 定义欠驱动UUV的期望位置与姿态如下：

$$[0117] \quad P_d(t) = [x_d(t), y_d(t), z_d(t), \theta_d(t), \psi_d(t)]^T \quad (3)$$

[0118] $x_d(t), y_d(t), z_d(t)$ 为期望位置， $\theta_d(t), \psi_d(t)$ 分别为期望纵倾角和艏向角。

[0119] 其中期望姿态可由期望位置确定：

$$[0120] \quad \begin{cases} \psi_d = \arctan \frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d} \\ \theta_d = -\arctan \frac{\dot{z}_d}{\sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}} \end{cases} \quad (4)$$

[0121] 建立虚拟欠驱动UUV五自由度模型如下：

$$[0122] \begin{cases} \dot{x}_d = u_d \cos(\psi_d) \cos(\theta_d) - v_d \sin(\psi_d) + w_d \cos(\psi_d) \sin(\theta_d) \\ \dot{y}_d = u_d \sin(\psi_d) \cos(\theta_d) + v_d \cos(\psi_d) + w_d \sin(\psi_d) \sin(\theta_d) \\ \dot{z}_d = -u_d \sin(\theta_d) + w_d \cos(\theta_d) \\ \dot{\theta}_d = q_d \\ \dot{\psi}_d = r_d / \cos(\theta_d) \end{cases} \quad (5)$$

$$[0123] \begin{cases} \dot{u}_d = \frac{m_{22}}{m_{11}} v_d r_d - \frac{m_{33}}{m_{11}} w_d q_d - \frac{X_u}{m_{11}} u_d - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u_d |u_d| + \frac{1}{m_{11}} \tau_{ud} \\ \dot{v}_d = -\frac{m_{11}}{m_{22}} u_d r_d - \frac{Y_v}{m_{22}} v_d - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v_d |v_d| \\ \dot{w}_d = \frac{m_{11}}{m_{33}} u_d q_d - \frac{Z_w}{m_{33}} w_d - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}} w_d |w_d| \\ \dot{q}_d = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} u_d w_d - \frac{M_q}{m_{55}} q_d - \frac{M_{q|q|}}{m_{55}} q_d |q_d| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \tau_{qd} \\ \dot{r}_d = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} u_d v_d - \frac{N_r}{m_{66}} r_d - \frac{N_{r|r|}}{m_{66}} r_d |r_d| + \frac{1}{m_{66}} \tau_{rd} \end{cases} \quad (6)$$

[0124] $\dot{x}_d, \dot{y}_d, \dot{z}_d$ 为固定坐标系下期望速度, $\dot{\theta}_d, \dot{\psi}_d$ 为期望纵倾角速度和艏向角速度, u_d, v_d, w_d 和 $\dot{u}_d, \dot{v}_d, \dot{w}_d$ 分别为船体坐标系下期望速度和期望加速度, q_d, r_d 为期望纵倾角速度和偏航角速度, $\tau_{ud}, \tau_{qd}, \tau_{rd}$ 为主推器、垂直舵、水平舵的期望控制向量,

[0125] 定义轨迹跟踪位姿和速度误差变量如下:

$$[0126] \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ \theta_e \\ \psi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ z - z_d \\ \theta - \theta_d \\ \psi - \psi_d \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ w_e \\ q_e \\ r_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_d \\ v - v_d \\ w - w_d \\ q - q_d \\ r - r_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0127] 将欠驱动UUV轨迹跟踪位姿误差变量沿式(1)和式(5)轨迹求导,得到跟踪位姿误差方程如下:

$$[0128] \quad \begin{cases} \dot{x}_e = u_e \cos \psi \cos \theta - v_e \cos \psi \sin \theta + u_d (\cos \psi \cos \theta - \cos \psi_d \cos \theta_d) \\ \quad - v_d (\sin \psi - \sin \psi_d) + w_d (\cos \psi \sin \theta - \cos \psi_d \sin \theta_d) \\ \dot{y}_e = u_e \sin \psi \cos \theta + v_e \cos \psi + w_e \sin \psi \sin \theta + u_d (\sin \psi \cos \theta - \sin \psi_d \cos \theta_d) \\ \quad - v_d (\cos \psi - \cos \psi_d) + w_d (\sin \psi \sin \theta - \sin \psi_d \sin \theta_d) \\ \dot{z}_e = -u_e \sin \theta + w_e \cos \theta - u_d (\sin \theta - \sin \theta_d) + w_d (\cos \theta - \cos \theta_d) \end{cases} \quad (8)$$

$$[0129] \quad \begin{cases} \dot{\theta}_e = q_e \\ \dot{\psi}_e = \frac{r}{\cos \theta} - \frac{r_d}{\cos \theta_d} \end{cases} \quad (9)$$

[0130] 将欠驱动UUV轨迹跟踪速度误差变量沿式(2)和式(6)轨迹求导,得到跟踪速度误差方程如下:

$$[0131] \quad \begin{cases} \dot{u}_e = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{m_{33}}{m_{11}} wq - \frac{X_u}{m_{11}} u - \frac{X_{u|u}}{m_{11}} u|u| - \dot{u}_d + \frac{1}{m_{11}} \omega_u + \frac{\tau_u (t - T_1')}{m_{11}} \\ \dot{v}_e = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{Y_v}{m_{22}} v - \frac{Y_{v|v}}{m_{22}} v|v| - \dot{v}_d + \frac{\omega_v}{m_{22}} \\ \dot{w}_e = \frac{m_{11}}{m_{33}} uq - \frac{Z_w}{m_{33}} w - \frac{Z_{w|w}}{m_{33}} w|w| - \dot{w}_d + \frac{\omega_w}{m_{33}} \end{cases} \quad (10)$$

$$[0132] \quad \begin{cases} \dot{q}_e = \frac{(m_{33} - m_{11})}{m_{55}} uw - \frac{M_q}{m_{55}} q - \frac{M_{q|q}}{m_{55}} q|q| - \frac{\overline{BGM}_L \sin \theta}{m_{55}} - \dot{q}_d + \frac{\tau_q (t - T_2')}{m_{55}} + \frac{1}{m_{55}} \omega_q \\ \dot{r}_e = \frac{(m_{11} - m_{22})}{m_{66}} uv - \frac{N_r}{m_{66}} r - \frac{N_{r|r}}{m_{66}} r|r| - \dot{r}_d + \frac{\tau_r (t - T_3')}{m_{66}} + \frac{1}{m_{66}} \omega_r \end{cases} \quad (11)$$

[0133] 为便于推导,轨迹跟踪位置误差方程写成如下矢量形式:

$$[0134] \quad \mathbf{P}_e(t) = \mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_d(t) = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} \quad (12)$$

[0135] 定义欠驱动UUV的线速度误差 v_e 为位置控制系统的虚拟控制输入,则有:

$$[0136] \quad \mathbf{v}_e(t) = \mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_d(t) = \begin{bmatrix} u_e \\ v_e \\ w_e \end{bmatrix} \quad (13)$$

[0137] 将式(8)写成如下矢量形式:

$$[0138] \quad \dot{\mathbf{P}}_e = \dot{\mathbf{P}} - \dot{\mathbf{P}}_d = \mathbf{S}(\theta, \psi) \mathbf{v}_e + (\mathbf{S}(\theta, \psi) - \mathbf{S}(\theta_d, \psi_d)) \mathbf{v}_d \quad (14)$$

$$[0139] \quad \text{式中, } \mathbf{v}_d = [u_d \ v_d \ w_d]^T, \mathbf{S}(\theta, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi & \sin \psi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \text{为忽略}$$

UUV横倾运动后的刚体坐标系到固定坐标系的旋转变换矩阵。

[0140] 步骤3中根据滑模变结构控制思想,设计一阶积分滑模面,使得位置误差 $P_e(t)$ 收敛至零,计算出位置误差系统的虚拟控制输入 v_e 的期望控制律 α_v ,定义虚拟控制误差 e ,将轨迹跟踪位置误差镇定转移到对虚拟控制误差镇定上;

[0141] 为了实现轨迹跟踪的目标,设计如下的一阶非线性滑模面,使得位置误差 $P_e(t)$ 收敛至零:

$$[0142] \quad \mathbf{S}_0(t) = \mathbf{P}_e(t) + \boldsymbol{\lambda}_0 \int_0^t \mathbf{sig}^\alpha(\mathbf{P}_e(l)) dl - \mathbf{P}_e(0) \quad (15)$$

[0143] 式中, $\mathbf{S}_0(t) = [S_{01}(t), S_{02}(t), S_{03}(t)]^T$ 为由三个位置误差对应的一阶非线性滑模面组成的向量; $\boldsymbol{\lambda}_0 = \text{diag}(\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03})$ 为由三个一阶滑模面的积分系数组成的对角系数阵,并且满足 $\lambda_{01}, \lambda_{02}, \lambda_{03} > 0$;

$$\mathbf{sig}^\alpha(\mathbf{P}_e) = \left[|x_e|^{\alpha_1} \text{sgn}(x_e), |y_e|^{\alpha_2} \text{sgn}(y_e), |z_e|^{\alpha_3} \text{sgn}(z_e) \right]^T, \text{其中 } \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in$$

$(0, 1)$ 。并且具有性质 $S_0(0) = 0$,因此所设计的滑模面初始即在滑模面上,直接进入滑模段。

[0144] 对式(15)求关于时间的微分,可得:

$$[0145] \quad \dot{\mathbf{S}}_0(t) = \dot{\mathbf{P}}_e(t) + \boldsymbol{\lambda}_0 \mathbf{sig}^\alpha(\mathbf{P}_e(t)) \quad (16)$$

[0146] 令 $\dot{\mathbf{S}}_0(t) = 0$,则有:

$$[0147] \quad \dot{\mathbf{P}}_e(t) = -\boldsymbol{\lambda}_0 \mathbf{sig}^\alpha(\mathbf{P}_e(t)) \quad (17)$$

[0148] 将上式展开,即:

$$[0149] \quad \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{z}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_{01} \text{sig}^{\alpha_1}(x_e) \\ -\lambda_{02} \text{sig}^{\alpha_2}(y_e) \\ -\lambda_{03} \text{sig}^{\alpha_3}(z_e) \end{bmatrix} \quad (18)$$

[0150] 根据式 (8) 可知位置误差方程状态完全可测, 仅设计等效控制律便可消除位置误差。将 $\dot{\mathbf{S}}_0(t) = \mathbf{0}$ 代入 (14) 和 (16) 可得位置误差系统的虚拟控制输入 \mathbf{v}_e 的期望控制律为:

$$[0151] \quad \alpha_v = -S(\theta, \psi)^T \lambda_0 \text{sig}^\alpha(P_e(t)) - S(\theta, \psi)^T (S(\theta, \psi) - S(\theta_d, \psi_d)) \mathbf{v}_d \quad (19)$$

[0152] 式中: $\alpha_v = [\alpha_u, \alpha_v, \alpha_w]^T$, 分别由对应的线速度 $\mathbf{v}_e = [u_e, v_e, w_e]^T$ 的期望控制律组成。

[0153] 由下述定理:

[0154] 定理: 对于如下给定的全局有限时间稳定的系统: $\dot{x} = -\eta |x|^\alpha \text{sgn}(x)$, 式中, $\eta > 0, \alpha \in (0, 1)$ 。若对于任意初始状态 $x(t_0)$, 状态将在 $t = t_0 + |x(t_0)|^{1-\alpha}/\eta(1-\alpha)$ 时收敛到零点, 则系统经过时间 $T(x(t_0)) = |x(t_0)|^{1-\alpha}/\eta(1-\alpha)$ 可以镇定。

[0155] 可知, 所设计的期望控制律 α_v 可以消除位置误差, 使 P_e 在有限时间内收敛至零的时间分别为:

$$[0156] \quad t_{c1} = \frac{|x_e(0)|^{\alpha_1}}{\lambda_{01}(1-\alpha_1)}, t_{c2} = \frac{|y_e(0)|^{\alpha_2}}{\lambda_{02}(1-\alpha_2)}, t_{c3} = \frac{|z_e(0)|^{\alpha_3}}{\lambda_{03}(1-\alpha_3)} \quad (20)$$

[0157] 考虑到 $\alpha_v = [\alpha_u, \alpha_v, \alpha_w]^T$ 并不是真实存在的控制输入, 定义虚拟控制误差为:

$$[0158] \quad \mathbf{e} = \mathbf{v}_e - \alpha_v = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e - \alpha_u \\ v_e - \alpha_v \\ w_e - \alpha_w \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0159] 对 \mathbf{e} 沿式 (10) 的轨迹进行微分可得:

$$[0160] \quad \begin{cases} \dot{e}_u = \frac{m_{22}}{m_{11}} vr - \frac{m_{33}}{m_{11}} wq - \frac{X_u}{m_{11}} u - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u|u| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \frac{1}{m_{11}} \omega_u + \frac{\tau_u(t-T_1')}{m_{11}} \\ \dot{e}_v = -\frac{m_{11}}{m_{22}} ur - \frac{Y_v}{m_{22}} v - \frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} v|v| - \dot{v}_d - \dot{\alpha}_v + \frac{\omega_v}{m_{22}} \\ \dot{e}_w = \frac{m_{11}}{m_{33}} uq - \frac{Z_w}{m_{33}} w - \frac{Z_{w|w|}}{m_{33}} w|w| - \dot{w}_d - \dot{\alpha}_w + \frac{\omega_w}{m_{33}} \end{cases} \quad (22)$$

[0161] 将式 (19) 和式 (21) 代入式 (14) 可得:

$$[0162] \quad \dot{P}_e = -\lambda_0 \text{sig}^\alpha(P_e) + S(\theta, \psi) \mathbf{e} = \mathbf{f}_1(t, P_e) + \mathbf{g}(t, P_e, \mathbf{e}) \quad (23)$$

[0163] 同理, 将式 (22) 写成:

$$[0164] \quad \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}_2(t, \mathbf{e}) \quad (24)$$

[0165] 因此欠驱动UUV轨迹跟踪时滞控制系统可以由如下两个子系统级联表示:

$$[0166] \quad \begin{cases} \Sigma_1 : \dot{P}_e = \mathbf{f}_1(t, P_e) + \mathbf{g}(t, P_e, \mathbf{e}) \\ \Sigma_2 : \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{f}_2(t, \mathbf{e}) \end{cases} \quad (25)$$

[0167] 由级联系统稳定性定理可知两个子系统全局一致最终有界, 则系统 (25) 全局一致

最终有界。

[0168] 步骤4结合步骤2和步骤3中的数据,基于级联系统控制思想,针对外界未知有界干扰和参数摄动设计积分时滞滑模纵向、艏向、纵倾控制律,然后分别通过动力模型中的实际控制 τ_u, τ_q, τ_r 消除虚拟控制误差 e ;

[0169] 在步骤3中,已经将镇定轨迹跟踪位置误差问题转换成了镇定虚拟控制误差问题。现在需要设计控制器镇定子系统 Σ_2 ,使虚拟控制误差 $e = [e_u, e_v, e_w]^T$ 收敛至零。

[0170] 考虑到输入时滞对系统的本质影响是造成控制力和控制力矩的滞后输出,使运动状态的变化滞后,因此输入时滞可以等效为系统的状态时滞,下文中 T 为与输入时滞等效的未知有界状态时滞,且上界为 T_m 。

[0171] (1) 针对纵向虚拟控制误差,定义如下一阶非线性滑模平面:

$$[0172] \quad S_1 = e_u + \lambda_1 \int_0^t e_u(l) dl, \quad \lambda_1 > 0 \quad (26)$$

[0173] 考虑系统存在输入时滞,对式(26)两边微分,结合(22)则有:

$$[0174] \quad \dot{S}_1 = \dot{e}_u + \lambda_1 e_u \quad (27)$$

$$[0175] \quad \begin{aligned} \dot{S}_1 = & \frac{m_{22}}{m_{11}} v(t-T)r(t-T) - \frac{m_{33}}{m_{11}} w(t-T)q(t-T) - \frac{X_u}{m_{11}} u(t-T) \\ & - \frac{X_{u|u|}}{m_{11}} u(t-T)|u(t-T)| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \frac{\tau_u}{m_{11}} + \lambda_1 e_u + \omega_1 \end{aligned} \quad (28)$$

[0176] 令:

$$[0177] \quad \begin{aligned} \hat{\tau}_{eq} = & \frac{\hat{m}_{22}}{\hat{m}_{11}} v(t-T)r(t-T) - \frac{\hat{m}_{33}}{\hat{m}_{11}} w(t-T)q(t-T) - \frac{\hat{X}_u}{\hat{m}_{11}} u(t-T) \\ & - \frac{\hat{X}_{u|u|}}{\hat{m}_{11}} u(t-T)|u(t-T)| - \dot{u}_d - \dot{\alpha}_u + \lambda_1 u_e \end{aligned} \quad (29)$$

[0178] 式中,“ $\hat{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的标称值,一般可以通过约束船模试验、自航船模试验以及实船试验等测定,“ $\tilde{\cdot}$ ”表示模型不确定参数的上界,并且满足如下边界条件:

$$[0179] \quad |m_{11} - \hat{m}_{11}| \leq \tilde{m}_{11}, |m_{22} - \hat{m}_{22}| \leq \tilde{m}_{22}, |m_{33} - \hat{m}_{33}| \leq \tilde{m}_{33}, |X_u - \hat{X}_u| \leq \tilde{X}_u, |X_{u|u|} - \hat{X}_{u|u|}| \leq \tilde{X}_{u|u|}$$

[0180] $\hat{\tau}_{eq}$ 为三维轨迹跟踪纵向速度控制器的等效控制律。选取如下饱和函数来削弱滑动模态中符号函数引起的抖振:

$$[0181] \quad \text{sat}(S_i/\Delta_i) = \begin{cases} 1 & , S_i > \Delta_i \\ S_i/\Delta_i & , |S_i/\Delta_i| \leq 1 \\ -1 & , S_i < -\Delta_i \end{cases} \quad (30)$$

[0182] 式中 Δ_i 通常选为较小的正值,定义了一个 S_i 周围厚度任意小的边界层。

[0183] 由于子系统 Σ_2 模型受参数不确定性的约束,设计如下的等速趋近律来消除这种负面影响:

$$\begin{aligned}
\eta_1 = & \frac{\tilde{m}_{22}}{\tilde{m}_{11}} |v(t-T)r(t-T)| + \frac{\tilde{m}_{33}}{\tilde{m}_{11}} |w(t-T)q(t-T)| + \frac{\tilde{X}_u}{\tilde{m}_{11}} |u(t-T)| + \\
& \frac{\tilde{X}_{u|u|}}{\tilde{m}_{11}} u^2(t-T) + |\dot{u}_d| + |\dot{\alpha}_u| + \lambda_1 |u_e| + \rho_1
\end{aligned} \tag{31}$$

[0185] 式中, ρ_1 为待确定正常数。

[0186] 为消除时滞、参数不确定以及外界干扰的影响, 最终设计纵向控制律 τ_u 为:

$$\tau_u = m_{11} \left[-\hat{\tau}_{eq} - \eta_1 \text{sat}(S_1/\Delta_1) - K_1 S_1 - H_1 S_1(t-T_m) \right] \tag{32}$$

[0188] 式中, $\eta_1 \geq \xi_1$, K_1 为正常数, H_1 为待确定增益矩阵系数。 K_1 与 H_1 的关系在步骤5中给出。

[0189] (2) 针对艏向虚拟控制误差, 定义如下二阶非线性滑模平面:

$$S_2 = \dot{e}_v + 2\lambda_2 e_v + \lambda_2^2 \int_0^t e_v(l) dl, \quad \lambda_2 > 0 \tag{33}$$

[0191] 对式 (33) 两边微分, 则有:

$$\dot{S}_2 = \ddot{e}_v + 2\lambda_2 \dot{e}_v + \lambda_2^2 e_v \tag{34}$$

[0193] 其中, \ddot{e}_v 可由式 (22) 求导得:

$$\begin{aligned}
\ddot{e}_v = & -\frac{m_{11}}{m_{22}} (\dot{u}r(t-T) - u(t-T)\dot{r}) - \frac{Y_v}{m_{22}} \dot{v} \\
& - 2\frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} \dot{v}|v(t-T)| - \ddot{v}_d - \ddot{\alpha}_v + \frac{1}{m_{22}} \dot{\omega}_v \\
= & \frac{m_{22}(\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11}u}{m_{22}m_{66}} \left(\begin{aligned} & (m_{11} - m_{22})u(t-T)v(t-T) - N_r r(t-T) \\ & - N_{r|r} r(t-T)|r(t-T)| + \tau_r + \omega_r \end{aligned} \right) \\
& - \frac{m_{11}}{m_{22}} \dot{u}r(t-T) - \frac{Y_v}{m_{22}} \dot{v} - 2\frac{Y_{v|v|}}{m_{22}} \dot{v}|v(t-T)| - \ddot{v}_d + \frac{1}{m_{22}} \dot{\omega}_v - \Theta_r
\end{aligned} \tag{35}$$

[0195] 其中: $\Theta_r = \ddot{\alpha}_v + (\alpha_u + \alpha_w \tan \theta)\dot{r}$, 将式 (35) 代入式 (34) 则有:

$$\dot{S}_2 = \frac{\beta_r}{m_{22}m_{66}} \tau_r - \frac{\kappa_r}{m_{22}m_{66}} + \omega_2 \tag{36}$$

[0197] 式中, ω_2 为有界环境干扰, 选取定常上界为 ξ_2 ;

[0198] $\beta_r = m_{22}(\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11}(e_u + \alpha_u + u_d)$;

$$\begin{aligned}
\kappa_r = & (m_{22}(\alpha_u + \alpha_w \tan \theta) - m_{11}(e_u + \alpha_u + u_d)) \left(\begin{aligned} & ((m_{11} - m_{22})u(t-T)v(t-T) \\ & - N_r r(t-T) - N_{r|r} r(t-T)|r(t-T)|) \end{aligned} \right) \\
& + m_{11}m_{66}\dot{u}r(t-T) + m_{66}\dot{v} - 2m_{66}\dot{v}|v(t-T)| + m_{22}m_{66}(\ddot{v}_d + \Theta_r - 2\lambda_2\dot{e}_v - \lambda_2^2 e_v)
\end{aligned} \tag{37}$$

[0200] 设计如下的等速趋近律来子系统 Σ_2 参数不确定带来的负面影响:

$$[0201] \quad \eta_2 = \frac{\tilde{\kappa}_r}{\tilde{m}_{22}\tilde{m}_{66}} + \rho_2 \quad (37)$$

[0202] 式中, ρ_2 为待确定正常数, 所涉及到的不确定模型参数满足如下边界条件:

$$[0203] \quad |m_{66} - \hat{m}_{66}| \leq \tilde{m}_{66}, |Y_v - \hat{Y}_v| \leq \tilde{Y}_v, |Y_{v|v|} - \hat{Y}_{v|v|}| \leq \tilde{Y}_{v|v|}, |N_v - \hat{N}_v| \leq \tilde{N}_v, |N_{v|v|} - \hat{N}_{v|v|}| \leq \tilde{N}_{v|v|}$$

$$[0204] \quad \tilde{\kappa}_r = \left(\tilde{m}_{22} (|\alpha_u| + |\alpha_w| \tan \theta) + \tilde{m}_{11} (|e_u| + |\alpha_u| + |u_d|) \right) \left(\left((\tilde{m}_{11} + \tilde{m}_{22}) |u(t-T)v(t-T)| \right) \right. \\ \left. + \tilde{N}_r |r(t-T)| + \tilde{N}_{r|r}|r^2(t-T)| \right) +$$

$$\tilde{m}_{11}\tilde{m}_{66} |\dot{u}r(t-T)| + \tilde{m}_{66} |\dot{v}| + 2\tilde{m}_{66} |\dot{v}v(t-T)| + \tilde{m}_{22}\tilde{m}_{66} (|\dot{v}_d| + |\Theta_r| + 2\lambda_2 |\dot{e}_v| + \lambda_2^2 |e_v|)$$

[0205] “ \sim ”表示模型不确定参数的标称值, “ \sim ”表示模型不确定参数的上界, 为消除时滞、参数不确定以及外界干扰的影响, 最终设计艏向控制律 τ_r 为:

$$[0206] \quad \tau_r = \frac{\hat{m}_{22}\hat{m}_{66}}{\hat{\beta}_r} \left[\frac{\hat{\kappa}_r}{\hat{m}_{22}\hat{m}_{66}} - \eta_2 \text{sat}(S_2/\Delta_2) - K_2 S_2 - H_2 S_2(t-T_m) \right] \quad (38)$$

[0207] 式中, $\eta_2 \geq \xi_2$, K_2 为正常数, H_2 为待确定增益矩阵系数, K_2 与 H_2 的关系在步骤5中给出

[0208] (3) 针对纵倾虚拟控制误差, 定义如下二阶非线性滑模平面:

$$[0209] \quad S_3 = \dot{e}_w + 2\lambda_3 e_w + \lambda_3^2 \int_0^t e_w(l) dl, \lambda_3 > 0 \quad (39)$$

[0210] 对式 (39) 两边微分, 则有:

$$[0211] \quad \dot{S}_3 = \ddot{e}_w + 2\lambda_3 \dot{e}_w + \lambda_3^2 e_w \quad (40)$$

[0212] 与艏向处理方法类似, 可得到:

$$[0213] \quad \dot{S}_3 = \frac{\beta_q}{m_{33}m_{55}} \tau_q - \frac{\kappa_q}{m_{33}m_{55}} + \omega_3 \quad (41)$$

[0214] 式中, ω_3 为有界环境干扰, 选取定常上界为 ξ_3 ;

$$[0215] \quad \beta_q = m_{33}\alpha_u - m_{11}(e_u + \alpha_u + u_d);$$

$$[0216] \quad \kappa_q = \left(m_{11}(e_u + \alpha_u + u_d) - m_{33}\alpha_u \right) \left(\frac{(m_{33} - m_{11})uw - M_q q}{-M_{q|q}|q| - \overline{BGM}_L \sin \theta} \right) + m_{11}m_{55}\dot{u}q \\ - m_{55}Z_w \dot{w} - 2Z_{w|w|}\dot{w}|w| - m_{33}m_{55} \left(\ddot{w}_d + \Theta_q - 2\lambda_3 \dot{e}_w - \lambda_3^2 e_w \right)$$

[0217] 其中, $\Theta_q = \ddot{\alpha}_w + \dot{q}\alpha_u$, 设计如下的等速趋近律来消除子系统 Σ_2 参数不确定带来的负面影响:

$$[0218] \quad \eta_3 = \frac{\tilde{\kappa}_q}{\tilde{m}_{33}\tilde{m}_{55}} + \rho_3 \quad (42)$$

[0219] 式中, ρ_3 为待确定正常数, 所涉及到的不确定模型参数满足如下边界条件:

$$[0220] \quad |m_{55} - \hat{m}_{55}| \leq \tilde{m}_{55}, |Z_w - \hat{Z}_w| \leq \tilde{Z}_w, |Z_{w|w} - \hat{Z}_{w|w}| \leq \tilde{Z}_{w|w}, |M_q - \hat{M}_q| \leq \tilde{M}_q, |M_{q|q} - \hat{M}_{q|q}| \leq \tilde{M}_{q|q}$$

$$[0221] \quad \tilde{\kappa}_q = \left(\begin{array}{l} \tilde{m}_{11} (|e_u| + |\alpha_u| + |u_d|) \\ + \tilde{m}_{33} |\alpha_u| \end{array} \right) \left(\begin{array}{l} (\tilde{m}_{33} - \tilde{m}_{11}) |uw| + \tilde{M}_q |q| \\ + \tilde{M}_{q|q} q^2 + \tilde{BGM}_L \sin \theta \end{array} \right) + \tilde{m}_{11} \tilde{m}_{55} |\dot{u}q| + \\ \tilde{m}_{55} \tilde{Z}_w |\dot{w}| + 2\tilde{Z}_{w|w} |\dot{w}w| + \tilde{m}_{33} \tilde{m}_{55} (|\dot{w}_d| + \tilde{\Theta}_q + 2\lambda_3 |\dot{e}_w| + \lambda_3^2 |e_w|)$$

[0222] “ \sim ”表示模型不确定参数的标称值, “ $\tilde{\sim}$ ”表示模型不确定参数的上界, 为消除时滞、参数不确定以及外界干扰的影响, 设计纵倾控制律 τ_q 为:

$$[0223] \quad \tau_q = \frac{\hat{m}_{33}\hat{m}_{55}}{\hat{\beta}_q} \left[\frac{\hat{\kappa}_q}{\hat{m}_{33}\hat{m}_{55}} - \eta_3 \text{sat}(S_3/\Delta_3) - K_3 S_3 - H_3 S_3 (t - T_m) \right] \quad (43)$$

[0224] 式中, $\eta_3 \geq \xi_3$, K_3 为正常数, H_3 为待确定增益矩阵系数, K_3 与 H_3 的关系在步骤5中给出

[0225] 步骤5根据时滞系统稳定性理论, 要使 V 收敛, 需满足条件 \dot{V} 为负值, 再结合以上设计步骤, 推导带有时滞项的积分滑模控制器, 计算出了所设计的时滞积分滑模面收敛, 实现输入时滞下对欠驱动UUV空间轨迹跟踪控制。具体推导过程如下:

[0226] 定义滑模面向量为 $S = [S_1 \ S_2 \ S_3]^T$; 控制律向量为 $\tau = [\tau_u \ \tau_r \ \tau_q]^T$; 正定阵 $\lambda_0 = \text{diag}(3.94 \ 3.1475 \ 1.888)$; 可调增益矩阵 $H = \text{diag}(H_1 \ H_2 \ H_3)$; 有界干扰为 $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T$, 且满足 $|\omega_i| < \xi_i, i=1, 2, 3$; $\eta = \text{diag}(\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3)$, $\eta_i \geq \xi_i, i=1, 2, 3$ 。

[0227] 选取含时滞积分项的Lyapunov-Krasovskii泛函如下:

$$[0228] \quad V = \frac{1}{2} S^T S + \int_{t-T_m}^t S^T P S d\sigma \quad (44)$$

[0229] 式中, $P \in \mathbb{R}^3$ 为正定对角阵。显然 $V \geq 0$ 成立。结合所设计的控制器对泛函 (44) 沿滑模面进行求导, 可得:

$$[0230] \quad \begin{aligned} \dot{V} &= S^T \dot{S} + S^T P S - S^T (t - T_m) P S (t - T_m) \\ &= S^T [-\eta \text{sat}(S/\Delta) - K S - H S (t - T_m) + \omega] \\ &\quad + \dot{S} + S^T P S - S^T (t - T_m) P S (t - T_m) \end{aligned} \quad (45)$$

[0231] 其中, $\text{sat}(S/\Delta)$ 为公式 (30) 中出现过的饱和函数, 根据 $\eta = \text{diag}(\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3)$ 的性质, 则有:

$$[0232] \quad \dot{V} \leq -\sum_{i=1}^3 (\xi_i - \omega_i) |S_i| - S^T K S - S^T H S (t - T_m) + S^T P S - S^T (t - T_m) P S (t - T_m) \quad (46)$$

[0233] 对上式进行整理得到:

$$\begin{aligned}
\dot{V} &\leq \frac{1}{2} \mathbf{S}^T (t-T_m) \mathbf{H} \mathbf{S} (t-T_m) + \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{S} + \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{H} \mathbf{S} \\
[0234] \quad &- \sum_{i=1}^3 (\xi_i - \omega_i) |S_i| - \mathbf{S}^T \mathbf{K} \mathbf{S} - \mathbf{S}^T (t-T_m) \mathbf{P} \mathbf{S} (t-T_m) \\
&\leq - \sum_{i=1}^3 (\xi_i - \omega_i) |S_i| - \mathbf{S}^T \left(\mathbf{K} - \mathbf{P} - \frac{1}{2} \mathbf{H} \right) \mathbf{S} - \mathbf{S}^T (t-T_m) \left(\mathbf{P} - \frac{1}{2} \mathbf{H} \right) \mathbf{S} (t-T_m)
\end{aligned} \tag{47}$$

[0235] 为使 $\dot{V} \leq 0$ 保证系统全局一致最终有界, 所设计的控制律增益矩阵需满足以下条件:

$$[0236] \quad \begin{cases} \mathbf{K} - \mathbf{P} - \frac{1}{2} \mathbf{H} > 0 \\ \mathbf{P} - \frac{1}{2} \mathbf{H} > 0 \end{cases} \tag{48}$$

[0237] 由 $V \geq 0, \dot{V} \leq 0$, 可知 $S \in L_\infty$, 将控制律代入 $\dot{\mathbf{S}}$ 则有:

$$[0238] \quad \dot{\mathbf{S}} = -\boldsymbol{\eta} \text{sat}(\mathbf{S}/\Delta) - \mathbf{K} \mathbf{S} - \mathbf{H} \mathbf{S} (t-T_m) + \boldsymbol{\omega} \tag{49}$$

[0239] 由上式 (49) 可得 $\dot{\mathbf{S}} \in L_\infty$, 又已知 V 有界, 对式 (47) 从 0 到 ∞ 积分可知 $S \in L_2$ 。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $S \rightarrow 0$, 因此所设计的积分时滞滑模面收敛。

[0240] 仿真实验验证与分析

[0241] 为了验证所设计的欠驱动UUV时滞控制算法的性能, 以及对模型参数不确定和外界干扰的鲁棒性, 分别设计如下两个对比仿真任务:

[0242] (1) 时滞真值 0.5s, 考虑到可能出现更坏的情况, 选取时滞上界为 0.52s, 采用本文式 (14)、式 (16)、式 (18) 所给出的时滞滑模控制器 (Time-Delay Sliding Mode Control, TDSMC);

[0243] (2) 时滞真值 0.5s, 选取时滞上界为 0.52s, 采用常规滑模控制器 (Sliding Mode Control, SMC), 形式如下:

$$[0244] \quad \begin{cases} \tau'_u = m_{11} \left[-\hat{\tau}_{eq} - \eta_1 \text{sat}(S_1/\Delta_1) \right] \\ \tau'_q = \frac{\hat{m}_{33} \hat{m}_{55}}{\hat{\beta}_w} \left[\frac{\hat{k}_w}{\hat{m}_{33} \hat{m}_{55}} - \eta_3 \text{sat}(S_3/\Delta_3) \right] \\ \tau'_r = \frac{\hat{m}_{22} \hat{m}_{66}}{\hat{\beta}_r} \left[\frac{\hat{k}_r}{\hat{m}_{22} \hat{m}_{66}} - \eta_2 \text{sat}(S_2/\Delta_2) \right] \end{cases}$$

[0245] 为了验证轨迹跟踪控制器对参数不确定性的鲁棒性, 在欠驱动UUV的模型参数加入了 $\pm 10\%$ 的摄动量。为了验证控制器对外界干扰的鲁棒性, 仿真中加入的外界扰动值为: $\omega_u = 0.3\text{N}$, $\omega_v = 0.1\text{N}$, $\omega_w = 0.1\text{N}$, $\omega_q = 0.1\text{Nm}$, $\omega_r = 0.3\text{Nm}$ 。利用 Matlab/Simulink 仿真得到对比结果如图 2 (a)、图 2 (b)、图 3 (a)、图 3 (b)、图 4 (a)、图 4 (b)、图 5 (a)、图 5 (b)、图 6 (a)、图 6 (b)、图 7 (a)、图 7 (b)、图 8 (a)、图 8 (b)、图 9 (a) 和图 9 (b) 所示。

[0246] 图2(a)和图2(b)对比了本章所设计的时滞滑模控制器和常规滑模控制器驱动欠驱动UUV在同等时滞的情况下的下潜螺旋轨迹跟踪效果,从图中可以看出欠驱动UUV在所设计的TDSMC控制下实现了对螺旋下潜参考轨迹的平稳光滑跟踪,并且对模型参数摄动以及外界干扰具有良好的鲁棒性;欠驱动UUV在SMC的控制下也跟踪上了参考轨迹,但经过放大实际的跟踪轨迹发现,SMC控制下欠驱动UUV整个跟踪过程都存在较大的振荡,说明无时滞SMC的控制参数受系统引入的输入时滞影响较大。

[0247] 图3(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV位置跟踪误差曲线;图3(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV位置跟踪误差曲线;图4(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪平移速度响应曲线;图4(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪平移速度响应曲线;图5(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV平移速度跟踪误差曲线;图5(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV平移速度跟踪误差曲线。从时滞滑模控制器的仿真结果可以看出:在任务开始后的100s内,由于位置跟踪误差较大,纵向速度 u 和横向速度 v 快速响应,以跟踪上期望的位置;在100s之后,欠驱动UUV跟踪上了期望参考轨迹,三轴的线速度也收敛到了期望值, u_e, v_e, w_e 收敛到原点的一个小领域内。对比常规滑模控制器的仿真结果可以看出:虽然欠驱动UUV的位置误差也收敛至零,但出现了控制振荡,并且线速度响应与速度跟踪误差也出现了非常严重的振荡,并且不能平稳地收敛到原点。

[0248] 图6(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV姿态角跟踪误差曲线;图6(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV姿态角跟踪误差曲线;图7(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪角速度响应曲线;图7(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV轨迹跟踪角速度响应曲线;图8(a)是时滞滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV角速度跟踪误差曲线;图8(b)是常规滑模控制器在输入时滞下欠驱动UUV角速度跟踪误差曲线。从时滞滑模控制器的仿真结果可以看出:在任务开始100s之后,欠驱动UUV跟踪上位置以后,UUV开始进行螺旋下潜,纵倾角速度 q 和艏向角速度 r 较之前才有较大的响应,最终角速度误差也收敛至零。对比常规滑模控制器的仿真结果可以看出:姿态角跟踪上出现了非常严重的振荡,这和图5(a)中实际轨迹上出现的严重振荡现象相符,常规的滑模控制器对输入时滞鲁棒性较差,不能保证欠驱动UUV平稳光滑地跟踪上期望轨迹。

[0249] 图9(a)和图9(b)给出了两种控制器下欠驱动UUV的控制输入变化情况,控制输入出现了严重振荡,这也符合图2(a)、图2(b)、图3(a)、图3(b)、图4(a)、图4(b)、图5(a)、图5(b)、图6(a)、图6(b)、图7(a)、图7(b)、图8(a)和图8(b)的仿真结果。由此,可以看出在欠驱动UUV的轨迹跟踪控制中,虽然实际的执行器时延很小,但如果通过直接忽略时滞的方式来简化控制器的设计,会产生导致严重的控制振荡,这种振荡会对执行机构硬件产生较大的磨损,缩短使用寿命,甚至控制失效。

[0250] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

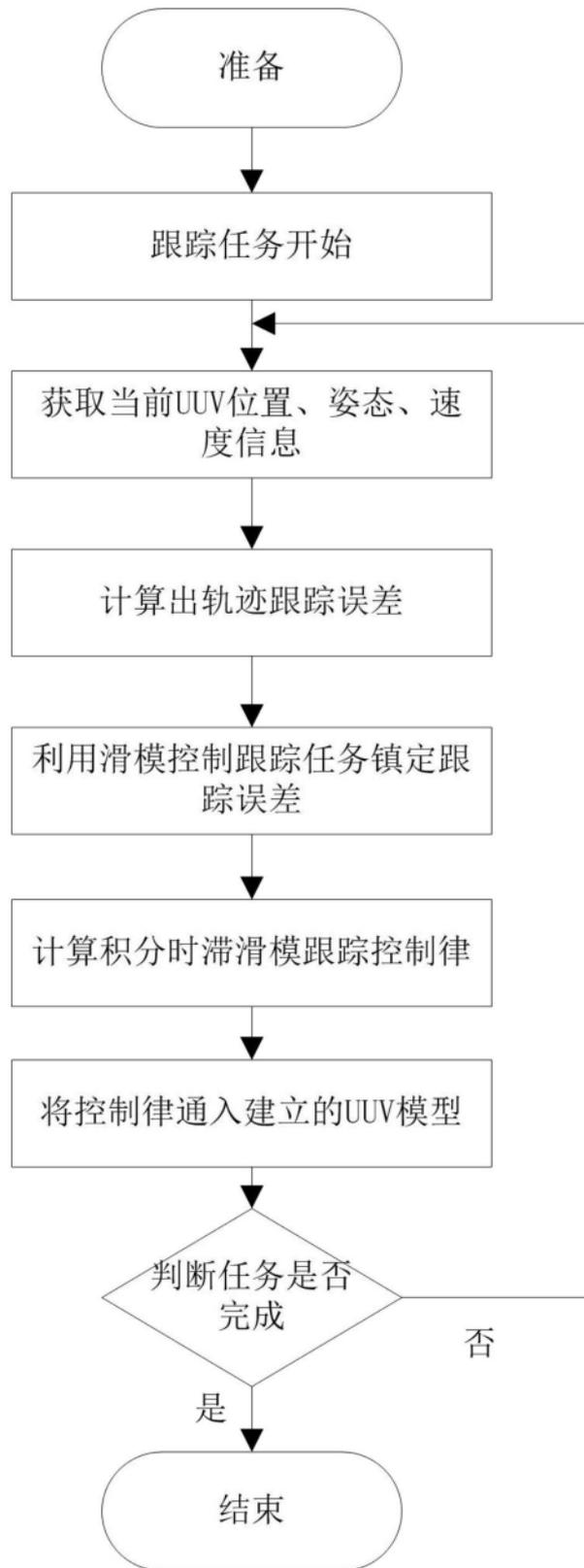


图1

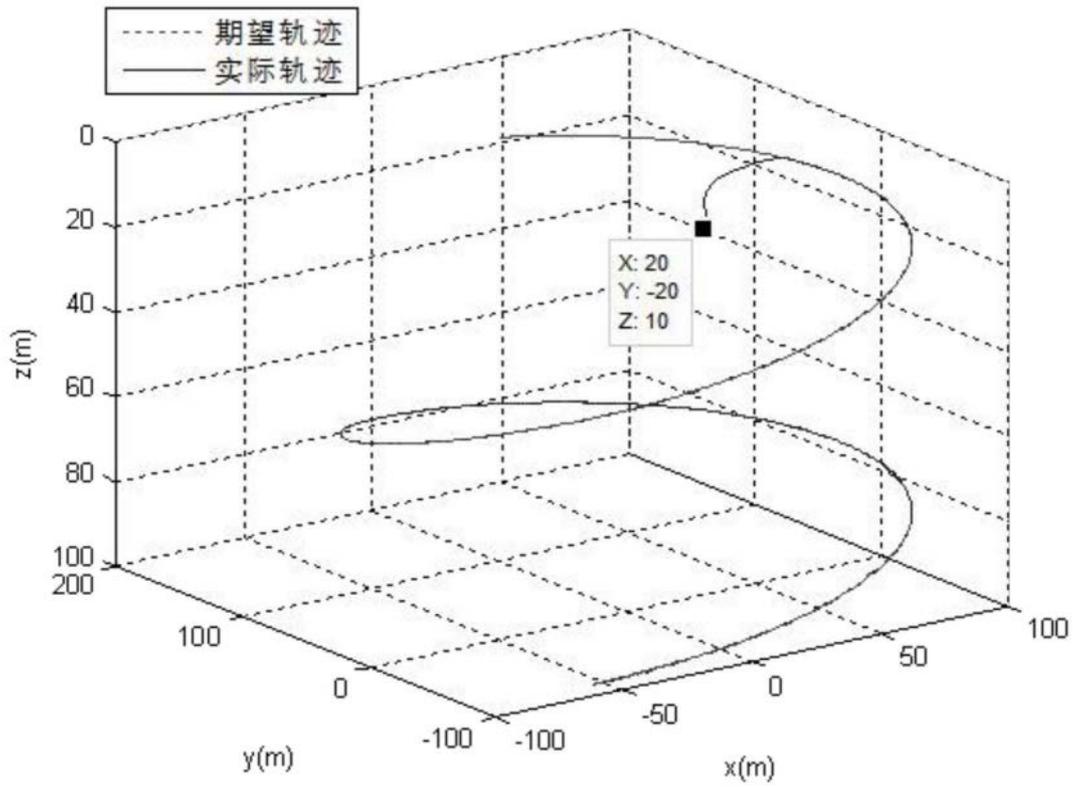


图2(a)

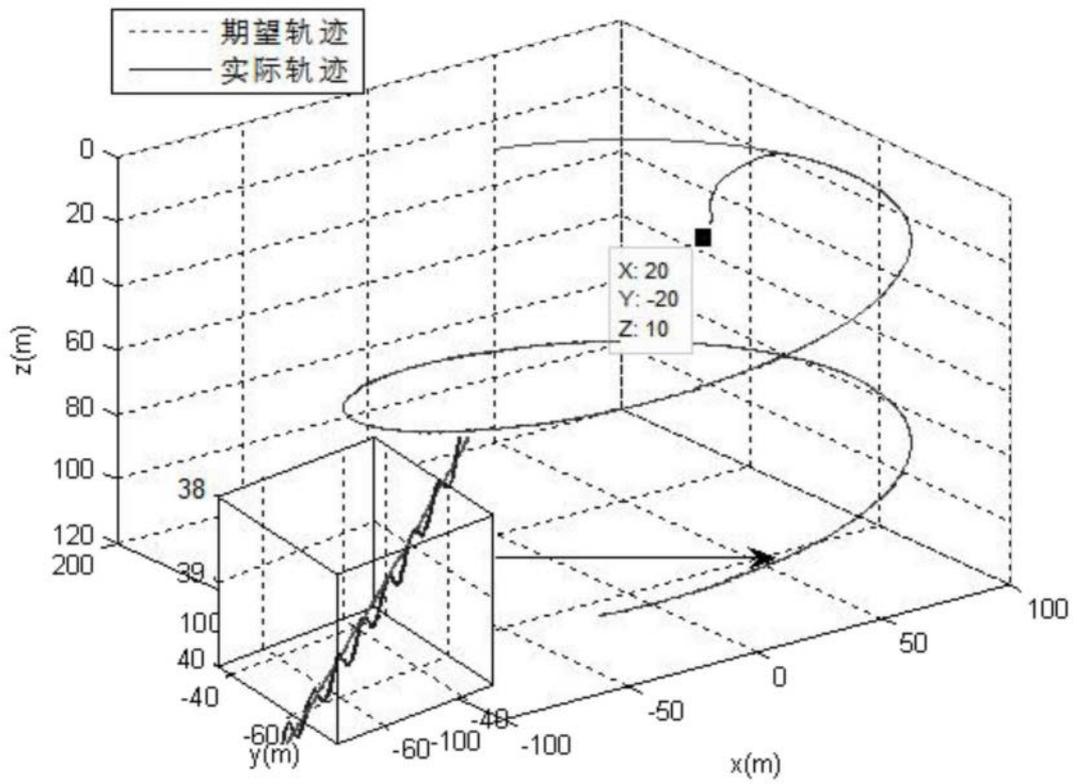


图2(b)

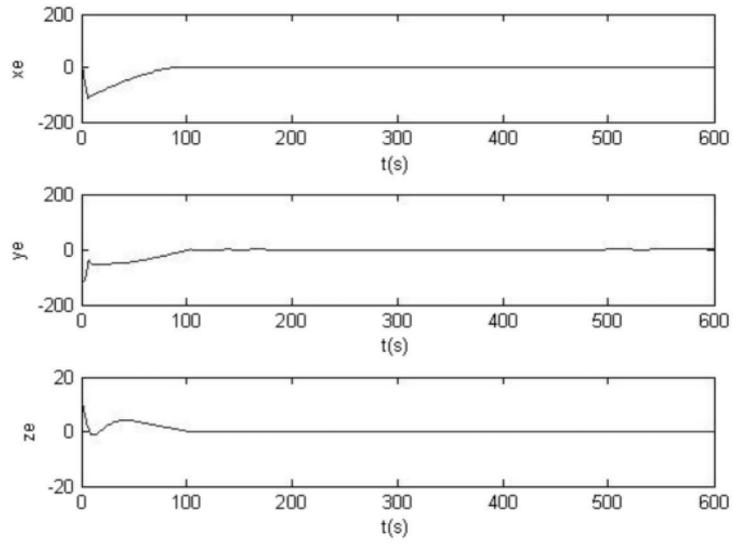


图3 (a)

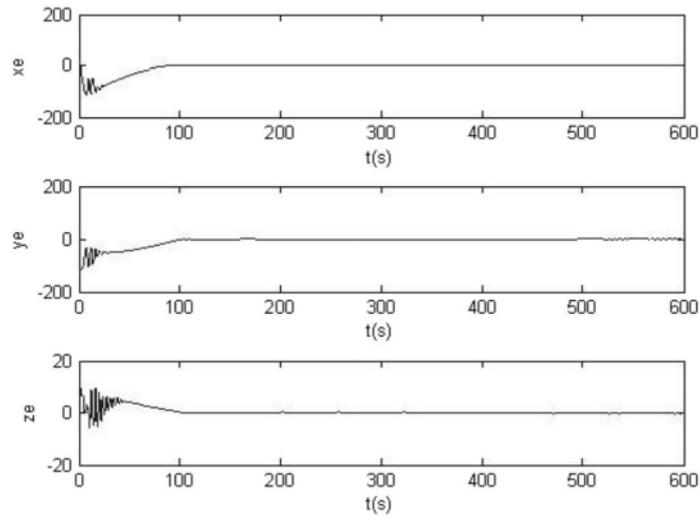


图3 (b)

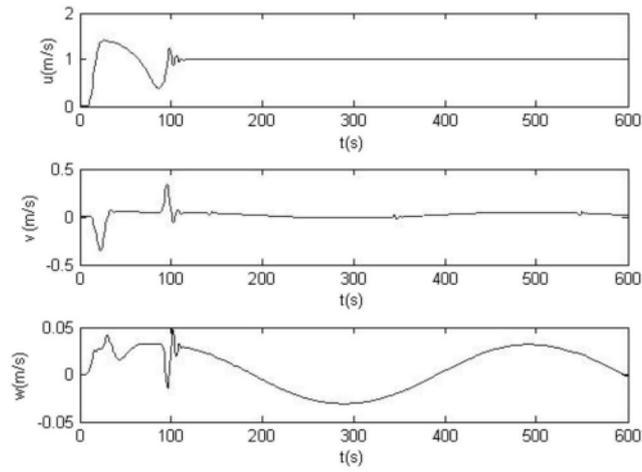


图4 (a)

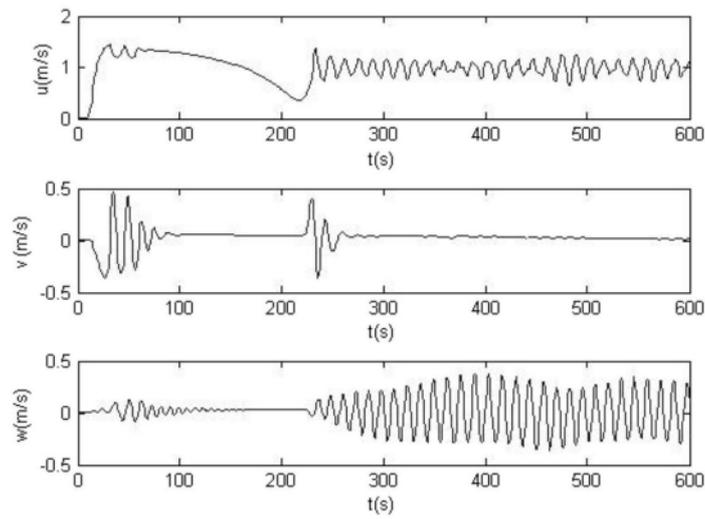


图4 (b)

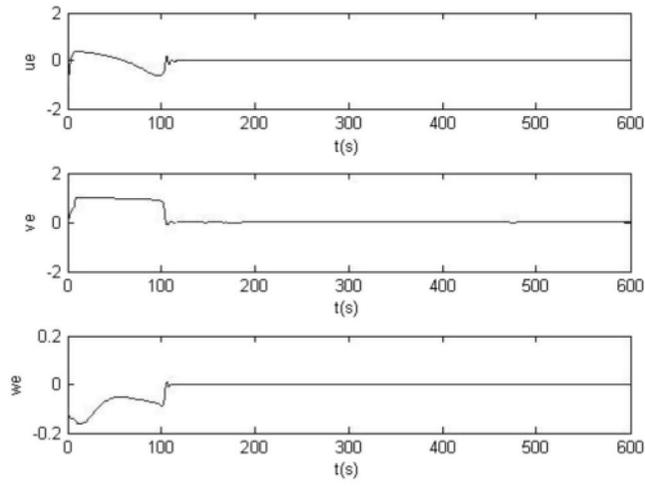


图5 (a)

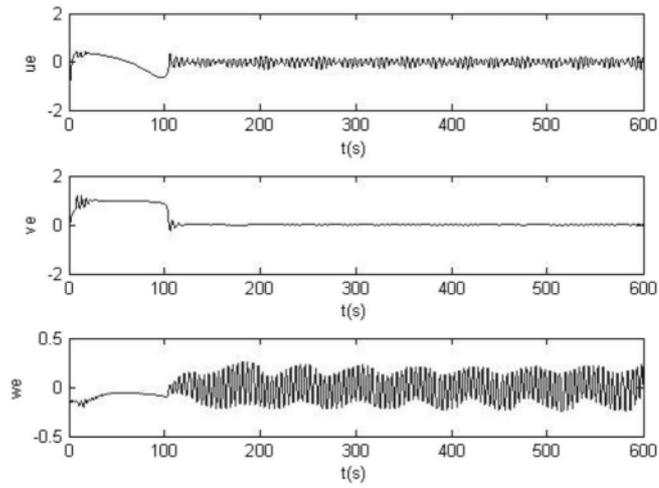


图5 (b)

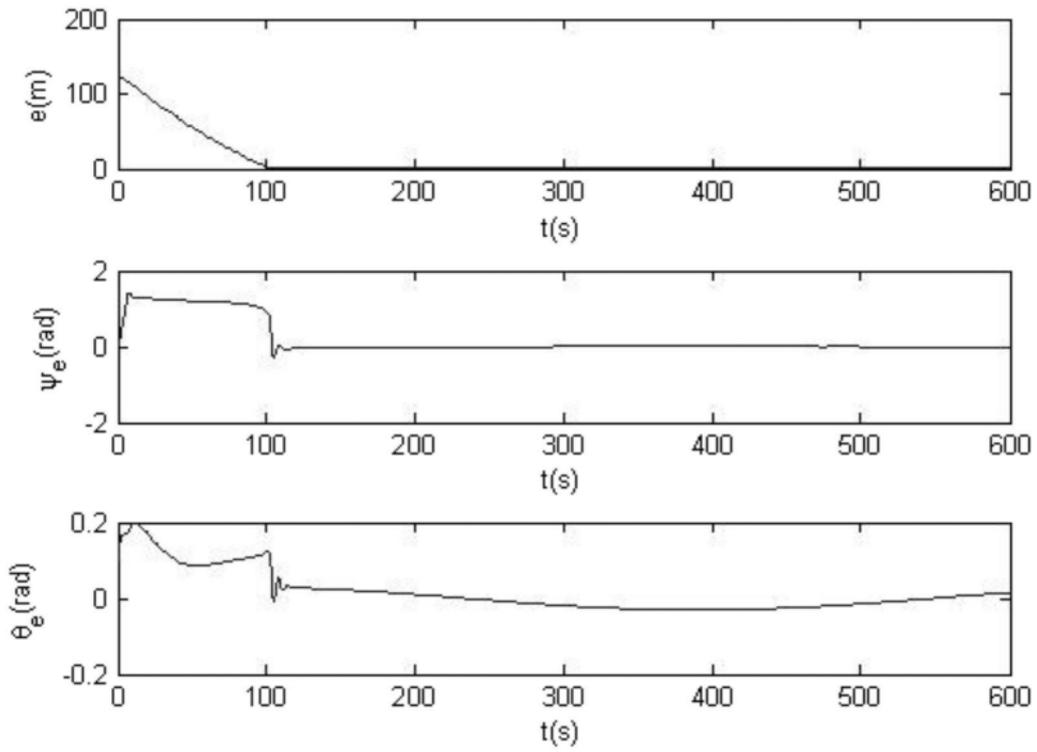


图6 (a)

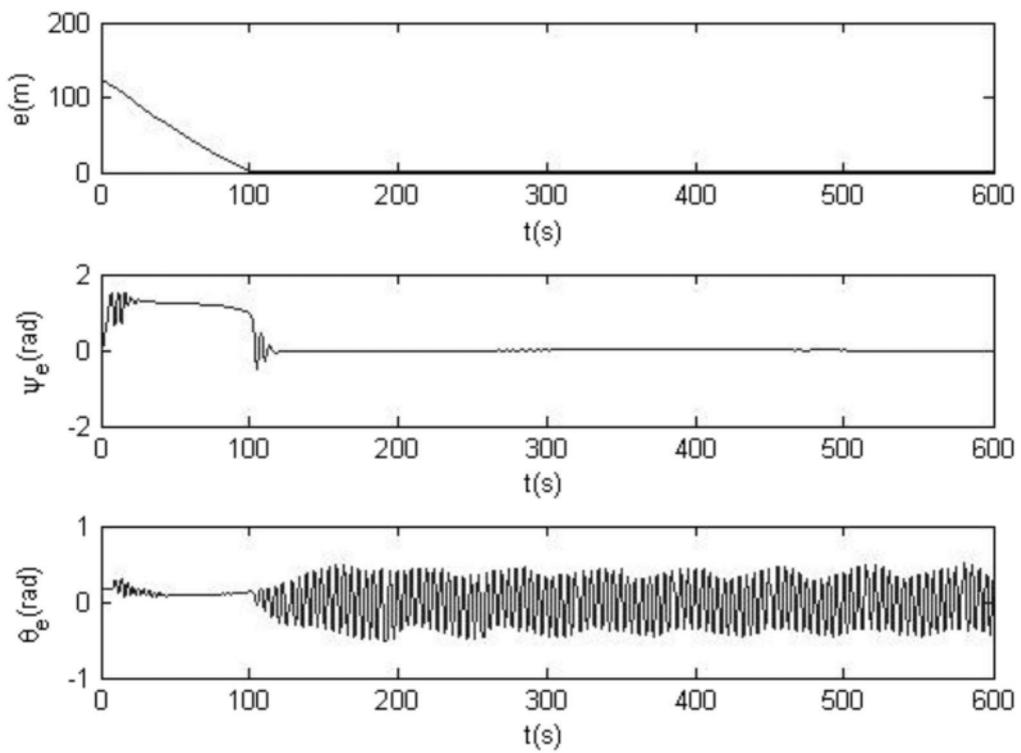


图6 (b)

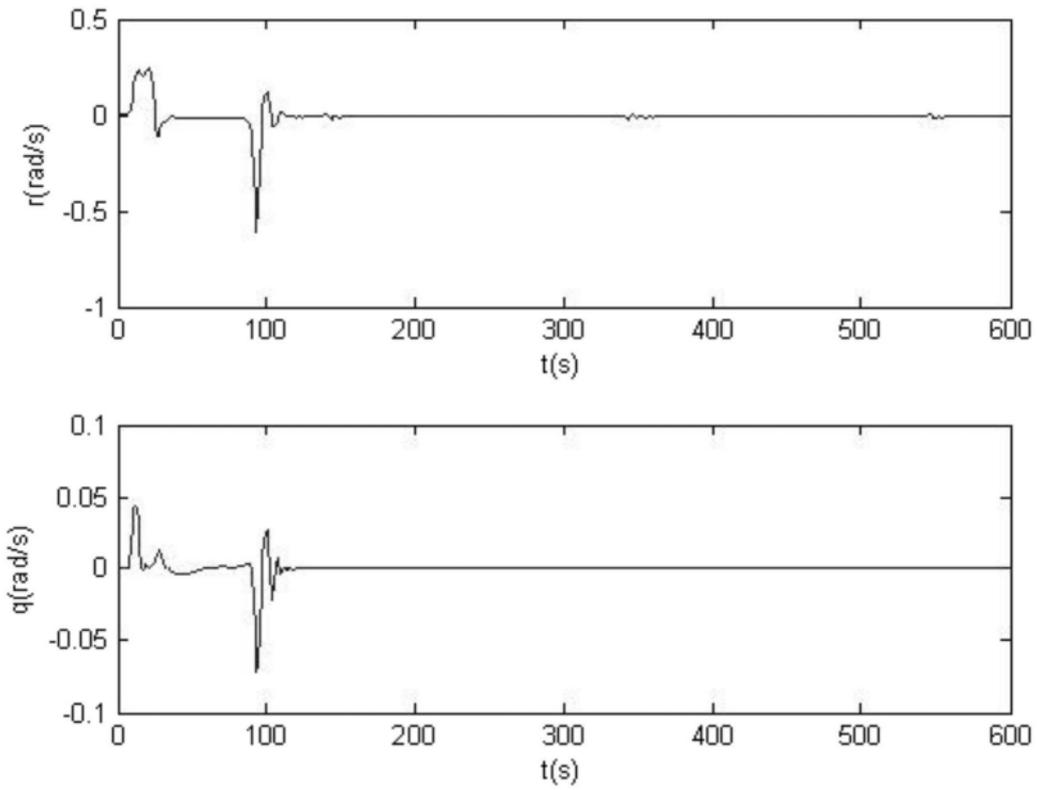


图7 (a)

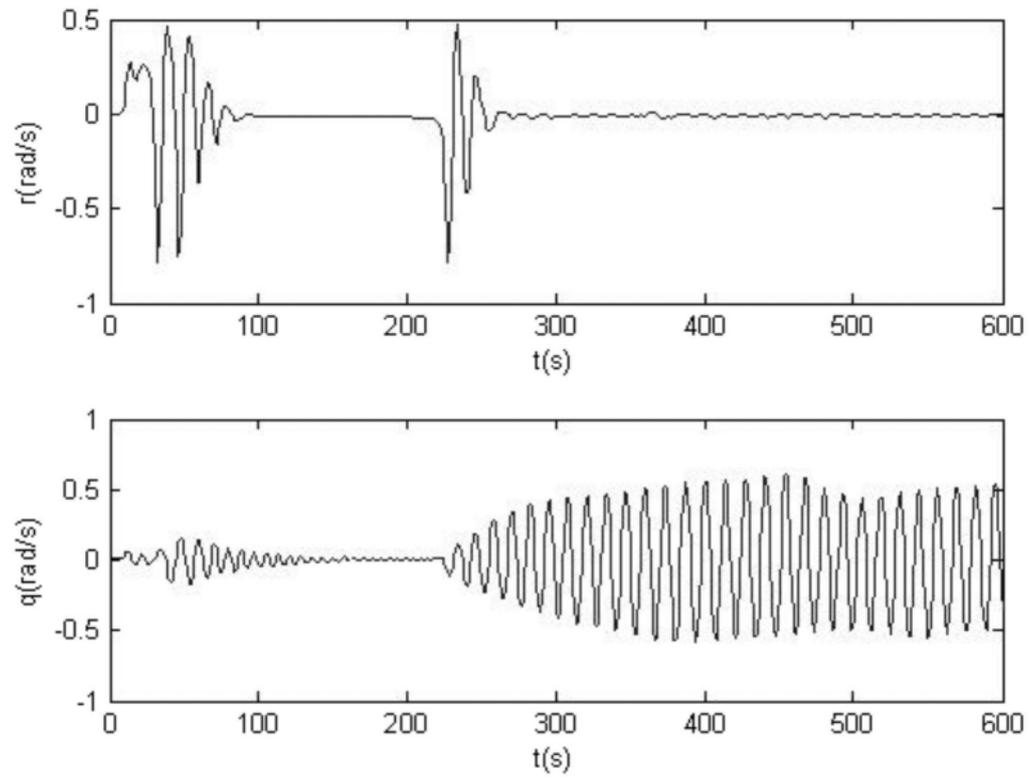


图7 (b)

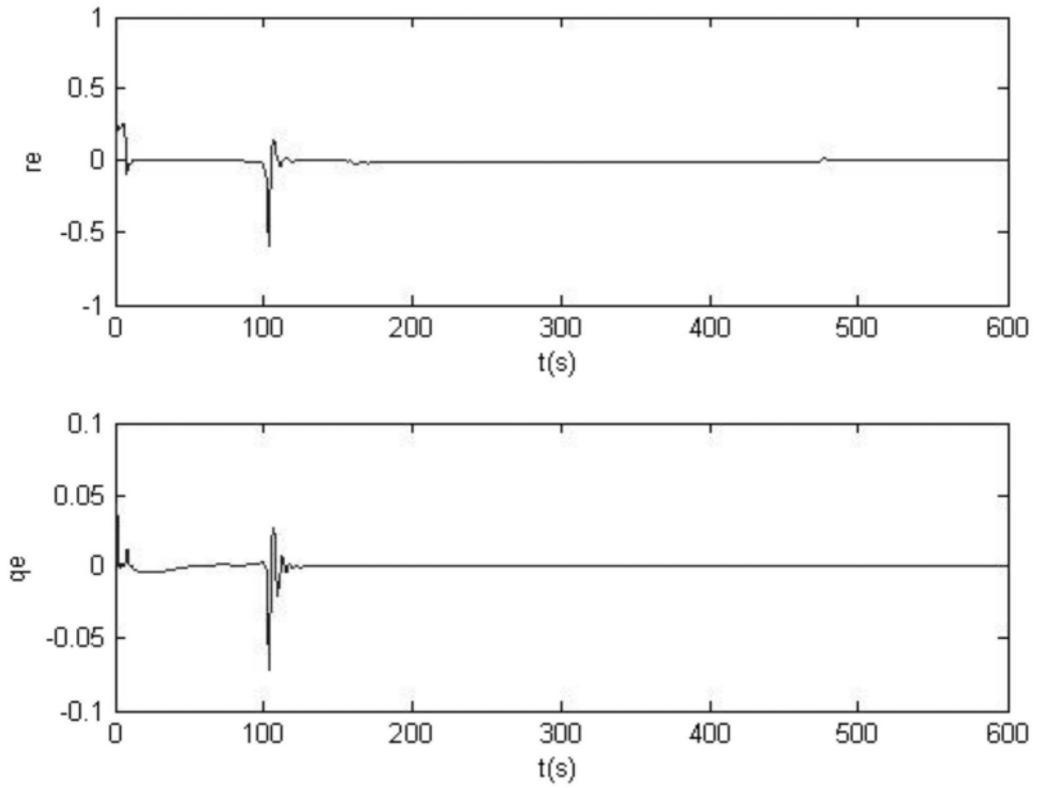


图8 (a)

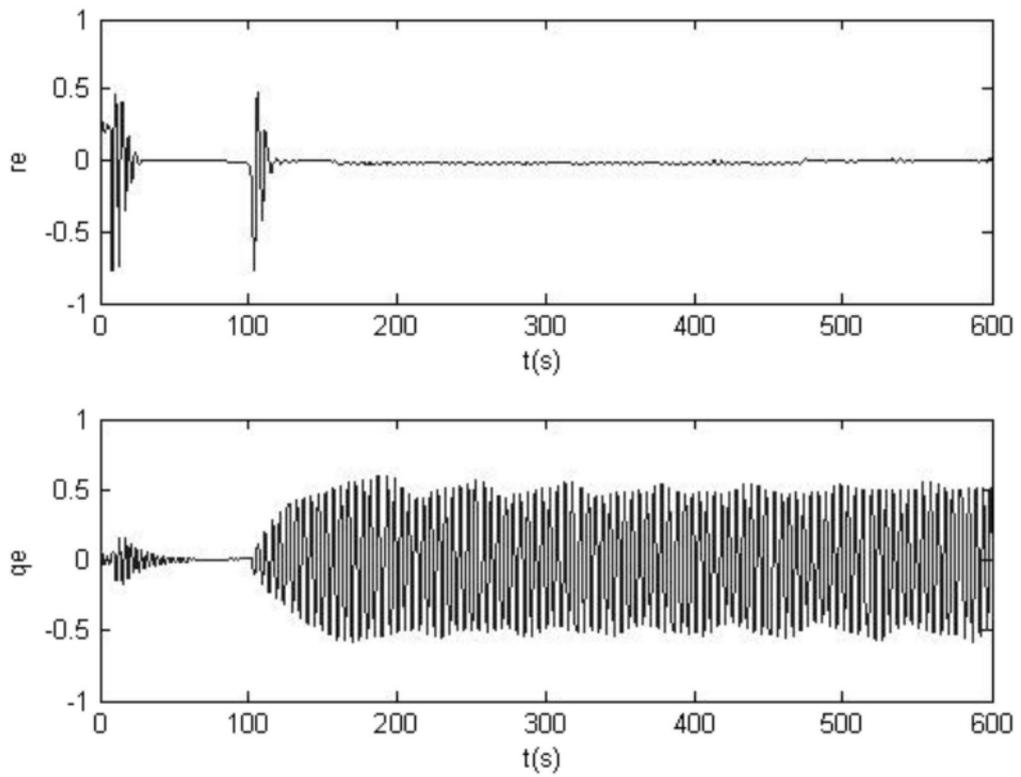


图8 (b)

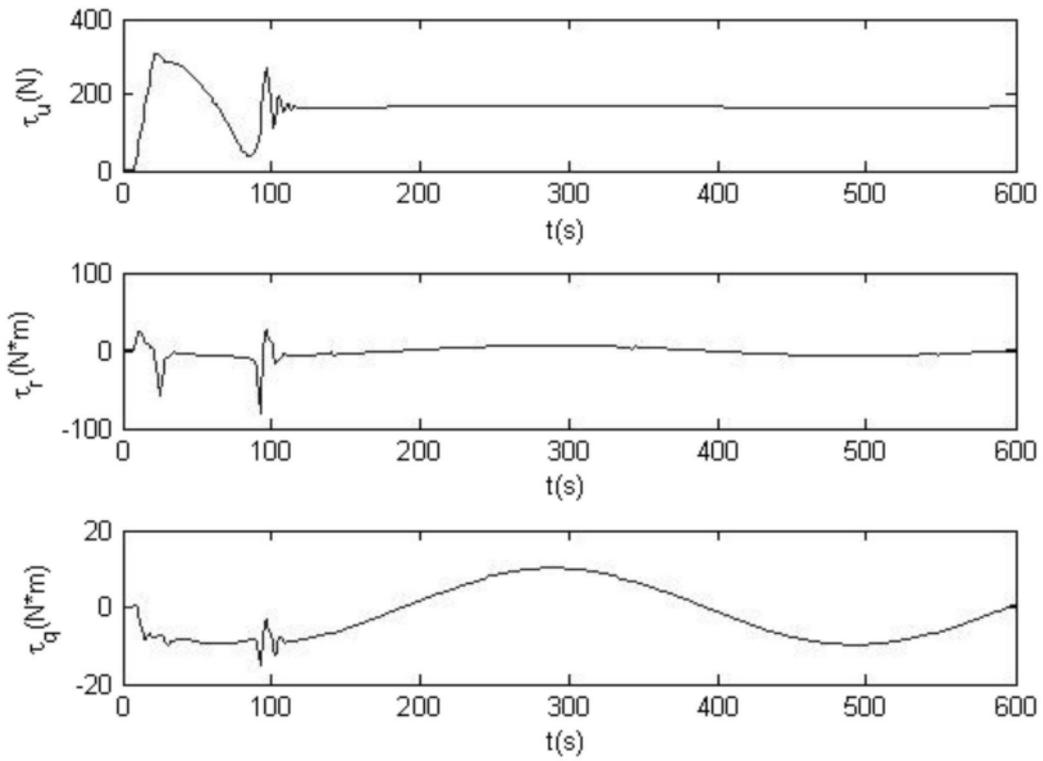


图9 (a)

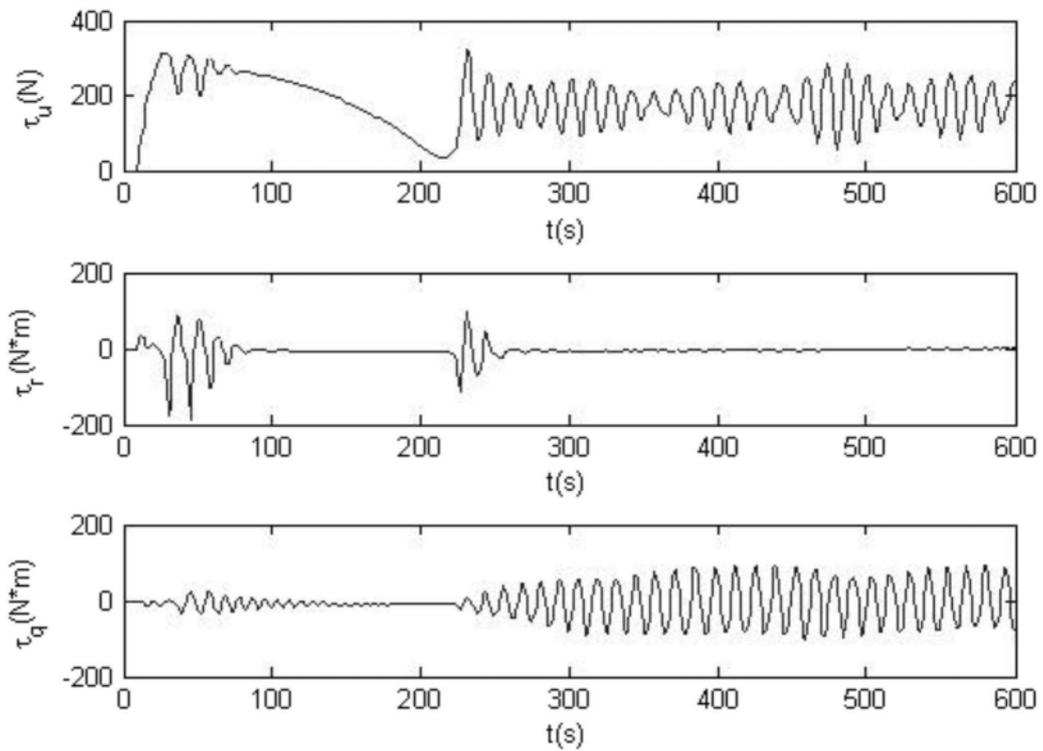


图9 (b)