

欠驱动无人水下航行器三维轨迹跟踪的反步控制

徐 健, 汪 慢[†], 乔 磊

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对欠驱动无人水下航行器(underactuated unmanned underwater vehicles, UUVs)三维轨迹跟踪控制问题, 本文有别于传统反步法中基于视线法设计姿态角误差变量的思路, 提出了一种定义虚拟速度误差变量的反步控制器设计方法, 能够有效避免传统反步法控制律设计时存在的奇异值问题, 简化了传统反步法复杂的计算过程; 设计了欠驱动UUV的三维轨迹跟踪控制器, 给出了系统的误差方程, 基于Lyapunov稳定性理论证明了系统在定常外界扰动下的鲁棒性和稳定性; 仿真结果表明本文提出的UUV三维轨迹跟踪反步控制方法收敛、有效, 能够实现欠驱动UUV对时变三维轨迹的精确跟踪控制。

关键词: 欠驱动无人水下航行器; 三维轨迹跟踪控制; 反步法; Lyapunov稳定性理论

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Backstepping-based controller for three-dimensional trajectory tracking of underactuated unmanned underwater vehicles

XU Jian, WANG Man[†], QIAO Lei

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: To deal with the three-dimensional trajectory-tracking control problem for underactuated unmanned underwater vehicles (UUVs), an approach based on defining virtual velocity error dynamics is proposed in the paper. In comparison with the attitude error dynamics based on the line-of-sight (LOS) guidance in the traditional backstepping, the proposed method can effectively avoid the singularity problem and simplify the calculations. The controller for an underactuated UUV in the presence of constant environmental disturbances is designed and the system kinematic error dynamics are given. Lyapunov stability theorem is used to prove the robustness and stability of the proposed controller. Numerical simulation results illustrate the effectiveness and good performance of the proposed method.

Key words: underactuated unmanned underwater vehicle; three-dimensional trajectory-tracking control; backstepping; Lyapunov stability theorem

1 引言(Introduction)

无人水下航行器(unmanned underwater vehicles, UUV)的航迹精确跟踪能力是实现水下勘探、救捞、水下特种作业等任务的技术基础^[1-2]。但是, 由于UUV通常具有欠驱动、加速度不可积的非完整约束等特性^[3-4], 除此之外, UUV的运动学与动力学模型还具有高度的非线性和耦合性^[5], 因此, UUV的轨迹跟踪控制问题具有特有的难点。

目前, 欠驱动UUV航迹跟踪控制研究主要集中在航迹点跟踪、路径跟踪与轨迹跟踪等3种目标跟踪控制模式。其中, 轨迹跟踪要求控制律能够导引UUV跟踪一条具有时变特性的参考轨迹, 对时间条件具有强约束, 因此与航迹点跟踪、路径跟踪控制相比, 轨迹跟踪控制更加难以实现。关于欠驱动UUV航迹跟踪的控

制方法, 比较常见的有神经网络^[6-8]、滑模控制^[9-11]、反步控制^[12-16]等, 以上各种控制方法各有特点和局限性。

关于欠驱动UUV的神经网络控制方法, 文献[6-7]提出了基于广义动态模糊神经网络的UUV直接自适应控制方法, 完全通过在线自适应算法构建UUV的逆动力学模型, 并在有外界干扰和神经网络逼近误差的前提下, 证明了UUV控制系统的跟踪误差一致稳定有界。文献[8]提出了一种基于 L_2 干扰抑制的鲁棒神经网络控制方法, 通过设计神经网络控制器来补偿非线性水动力阻尼和外界的海流干扰, 从而实现UUV三维航迹精确跟踪。以上神经网络控制方法的优点在于不需要知道UUV模型的准确参数和神经网络的结构; 但是, 由于自适应学习过程需要耗用一定的时间,

收稿日期: 2013-08-09; 录用日期: 2014-07-01。

[†]通信作者, E-mail: 1026809958@qq.com; Tel.: +86 15124525458。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179038); 中央高校基本科研业务费资助项目(HEUCF041337)。

UUV控制系统的实时性受到影响,只能克服复杂的慢变海流干扰。

关于欠驱动UUV的滑模控制方法,文献[9–11]提出采用虚拟向导法建立UUV空间运动误差方程,并基于递归滑模思想设计非线性滑模控制器,该方法的优点在于无需对UUV模型参数不确定部分和海流干扰进行估计,减小了舵的抖振现象及稳态误差与超调问题;但该方法只是降低抖振的幅度,并不能从本质上解决滑模控制的抖振问题,这也是UUV执行机构所不能容忍的。

反步控制也是目前欠驱动UUV航迹跟踪控制的常见方法。文献[12]提出了一种针对欠驱动UUV的鲁棒自适应路径跟踪控制方法,该控制器采用Lyapunov直接法和反步技术,针对UUV系统模型的参数不确定情况,采用Lipschitz连续映射算法进行估计,从而使路径跟踪误差任意小。文献[13]针对欠驱动UUV进行了平面轨迹规划与跟踪控制设计,给出了UUV的平滑二维参考轨迹,证明了该算法的收敛性,但该算法引入高阶的速度误差量,使得设计过程比较繁琐,控制律的表达形式相对复杂。文献[14]提出了一种在未知海流下实现欠驱动UUV水平面位置跟踪控制的方法,位置跟踪控制器及海流观测器分别利用反步法和Lyapunov稳定性理论进行实现,但是未对航向跟踪控制进行分析。文献[15]利用自适应反步法设计了连续时变的航迹点跟踪控制器,实现了欠驱动UUV的三维航迹点跟踪,但该方法只分析了航迹点的位置跟踪,未考虑时变轨迹对UUV姿态及速度控制的影响。文献[16]采用反馈增益反步法设计航迹跟踪控制器,与传统反步法设计相比简化了虚拟量的形式,但所设计的控制器只能针对分段连续的直线航迹跟踪控制,并不能跟踪任意一条三维时变轨迹。

本文以哈尔滨工程大学“BSA”UUV为研究对象,针对该欠驱动UUV三维轨迹跟踪控制中的位置、姿态、速度等的连续时变要求,有别于传统反步法中基于视线法设计姿态角误差变量的思路,提出了一种定义虚拟速度误差变量的反步控制器设计方法;设计了该欠驱动UUV的三维轨迹跟踪控制器,给出了系统的误差方程,并基于Lyapunov稳定性理论证明了系统在定常外界扰动下的鲁棒性和稳定性;通过理论分析对比讨论了传统反步法与本文的优缺点,能够有效避免传统反步法控制律设计时存在的奇异值问题,简化了传统反步法复杂的计算过程;仿真结果表明本文提出的UUV三维轨迹跟踪反步控制方法收敛、有效,能够实现欠驱动UUV对时变轨迹的精确跟踪控制。

2 欠驱动UUV运动建模(Underactuated UUV modeling)

哈尔滨工程大学“BSA”UUV的执行机构配置如

下:推进器在UUV艏部对称布置,用于实现对UUV纵向速度的控制;垂直舵用于实现对UUV艏向角的控制;水平舵用于实现对UUV深度与纵倾的控制。因此该UUV的空间运动具有欠驱动特性,其空间运动坐标系如图1所示,并在船体坐标系下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v, \\ M\dot{v} = \tau - C(v)v - D(v)v - g(\eta), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\eta = (x, y, z, \theta, \psi)^T \in \mathbb{R}^5$ 表示UUV在地面坐标系下的位置与姿态向量; $v = (u, v, w, q, r)^T \in \mathbb{R}^5$ 表示UUV在船体坐标系下的速度向量; M 为惯性矩阵,包括附加质量; $J(\eta)$ 为转换矩阵, $C(v)$ 为向心力和科氏力矩阵,包括附加质量产生的向心力和科氏力; $D(v)$ 为水动力阻力和升力力矩; $g(\eta)$ 为恢复力和力矩向量; $\tau = (\tau_u, \tau_q, \tau_r)^T \in \mathbb{R}^3$ 表示作用在UUV船体坐标系下的控制输入向量。船体坐标系下,欠驱动UUV动力学模型具有如下特性: $M = M^T > 0$, $\dot{M} = 0$, $C(v) = -C^T(v)$, $D(v) > 0$ 。

忽略高阶非线性水动力阻尼项和横摇运动对该UUV三维空间运动的影响,建立如下该欠驱动UUV的5自由度运动学与动力学模型^[17]:

1) UUV的运动学模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi \cos \theta - v \sin \psi + w \sin \theta \cos \psi, \\ \dot{y} = u \sin \psi \cos \theta + v \cos \psi + w \sin \theta \sin \psi, \\ \dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta, \\ \dot{\theta} = q, \\ \dot{\psi} = \frac{r}{\cos \theta}; \end{cases} \quad (2)$$

2) UUV的动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{m_{33}}{m_{11}}wq - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{\tau_u}{m_{11}}, \\ \dot{v} = -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_{22}}{m_{22}}v, \\ \dot{w} = \frac{m_{11}}{m_{33}}uq - \frac{d_{33}}{m_{33}}w, \\ \dot{q} = \frac{m_{33}-m_{11}}{m_{55}}uw - \frac{d_{55}}{m_{55}}q - \frac{\rho g \nabla \overline{GM}_L \sin \theta + \tau_q}{m_{55}}, \\ \dot{r} = \frac{m_{11}-m_{22}}{m_{66}}uv - \frac{d_{66}}{m_{66}}r + \frac{\tau_r}{m_{66}}. \end{cases} \quad (3)$$

3 控制器的设计(Controller design)

3.1 坐标转换(Coordinate transformation)

为了方便控制器的设计,本文通过利用坐标转换得到3个误差变量 x_e, y_e, z_e , 并且期望航向角和纵倾角完全由期望轨迹得到,描述如下:

$$\psi_d = \arctan \frac{\dot{y}_d}{\dot{x}_d}, \theta_d = -\arctan \frac{\dot{z}_d}{\sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}}. \quad (4)$$

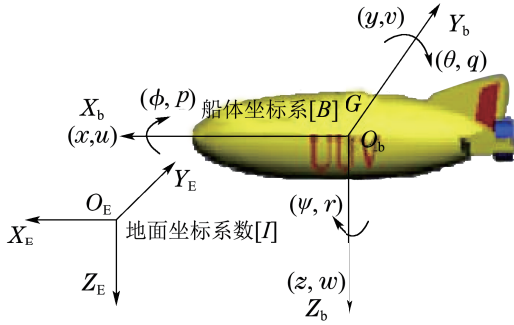


图 1 UUV坐标系

Fig. 1 Reference frames of UUV

定义 $v_t = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2}$, $v_p = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2 + \dot{z}_d^2}$, 且位置和姿态误差变量为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ \theta_e \\ \psi_e \end{bmatrix} = R(\eta) \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ z - z_d \\ \theta - \theta_d \\ \psi - \psi_d \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中:

$$R(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta \cos \psi & \sin \theta \sin \psi & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$(x_d, y_d, z_d, \psi_d, \theta_d)$ 分别表示在地面坐标系下的期望轨迹, $(x_e, y_e, z_e, \psi_e, \theta_e)$ 分别表示在船体坐标系下的位置与姿态误差。

结合式(2), 式(4)–(5), 对位置误差变量求导得到

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u + r y_e - q z_e - v_p \sin \theta_d \sin \theta - v_p \cos \theta_d \cos \theta \cos \psi_e, \\ \dot{y}_e = v - r x_e - z_e r \tan \theta + v_p \cos \theta_d \sin \psi_e, \\ \dot{z}_e = w + q x_e + y_e r \tan \theta + v_p \sin \theta_d \cos \theta - v_p \cos \theta_d \sin \theta \cos \psi_e. \end{cases} \quad (6)$$

注 1 考虑UUV实际工程应用时, UUV极少出现竖直状态, 且航行速度具有一定的区间限制, 提出如下假设条件:

- 1) 欠驱动UUV的纵倾角 θ , 满足对 $\forall t \geq 0$, 有 $|\theta(t)| < \pi/2$;
- 2) 期望的轨迹变量 u_d, r_d, q_d 及其导数 $\dot{u}_d, \dot{r}_d, \dot{q}_d$ 有界。

3.2 控制器设计(Controller design)

Step 1 首先构造Lyapunov函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}(x_e^2 + y_e^2 + z_e^2). \quad (7)$$

对式(7)两边求导, 并将式(6)代入得到

$$\dot{V}_1 = x_e(u - v_p \cos \theta_d \cos \theta \cos \psi_e -$$

$$v_p \sin \theta_d \sin \theta) + y_e(v_p \cos \theta_d \sin \psi_e + v) + z_e(w - v_p \cos \theta_d \sin \theta (\cos \psi_e - 1) - v_p \sin \theta_e). \quad (8)$$

传统反步法的设计思路是选择 ψ_e 和 θ_e 去分别镇定横向误差 y_e 和纵向误差 z_e , 本文通过定义如式(9)所示的虚拟速度误差变量, 将式(8)中有关 ψ_e 和 θ_e 的运算进行整体替换, 可有效避免初始状态约束引起的奇异值问题:

$$\alpha_1 = v_p \cos \theta_d \sin \psi_e, \alpha_2 = v_p \sin \theta_e. \quad (9)$$

为了使 $\dot{V}_1$ 为负, 把 u, α_1, α_2 作为虚拟控制变量, 它们的期望值 $u_d, \alpha_{1d}, \alpha_{2d}$ 选取为

$$\begin{cases} u_d = v_p \cos \theta_d \cos \theta \cos \psi_e + v_p \sin \theta_d \sin \theta - \frac{k_1 x_e}{e}, \\ \alpha_{1d} = -v - \frac{k_2 y_e}{e}, \\ \alpha_{2d} = w - v_p \cos \theta_d \sin \theta (\cos \psi_e - 1) + \frac{k_3 z_e}{e}, \end{cases} \quad (10)$$

其中: k_1, k_2, k_3 为正常数, $e = \sqrt{1 + x_e^2 + y_e^2 + z_e^2}$. 考虑到 $u_d, \alpha_{1d}, \alpha_{2d}$ 并不是真实的可控变量, 于是定义误差变量

$$u_e = u - u_d, \alpha_{1e} = \alpha_1 - \alpha_{1d}, \alpha_{2e} = \alpha_2 - \alpha_{2d}. \quad (11)$$

结合式(8)–(11), 得到

$$\dot{V}_1 = -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} + x_e u_e + y_e \alpha_{1e} - z_e \alpha_{2e}. \quad (12)$$

Step 2 结合式(7), 构造Lyapunov函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} u_e^2. \quad (13)$$

对式(13)两边求导, 可得

$$\dot{V}_2 = -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} + u_e(x_e + \dot{u}_e) + y_e \alpha_{1e} - z_e \alpha_{2e}. \quad (14)$$

控制输入 τ_u 选取为

$$\tau_u = m_{11}(-x_e + \dot{u}_d - k_4 u_e) - m_{22} v r + m_{33} w q + d_{11} u, \quad (15)$$

其中 k_4 为正常数, 并将上式代入UUV动力学模型式(3)中, 可得

$$\dot{V}_2 = -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 + y_e \alpha_{1e} - z_e \alpha_{2e}. \quad (16)$$

Step 3 构造Lyapunov函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} \alpha_{1e}^2. \quad (17)$$

结合式(10)–(11), 可得

$$\dot{\alpha}_{1e} = \dot{v}_t \sin \psi_e + v_t \cos \psi_e \left(\frac{r}{\cos \theta} - \dot{\psi}_d \right) - \dot{\alpha}_{1d}. \quad (18)$$

为了使 $\dot{V}_3$ 为负, 定义 $\bar{r} = r \cos \psi_e$, 期望值 $\bar{r}_d = r_d + \dot{\psi}_d \cos \theta (\cos \psi_e - 1)$, 选取 r 的期望值为

$$r_d = \dot{\psi}_d \cos \theta + \frac{(-y_e - \dot{v}_t \sin \psi_e + \dot{\alpha}_{1d} - k_5 \alpha_{1e}) \cos \theta}{v_t}, \quad (19)$$

其中 k_5 为正常数. 考虑到 r_d 并不是真实的可控变量, 于是定义误差变量

$$r_e = r - r_d, \quad \bar{r}_e = \bar{r} - \bar{r}_d, \quad (20)$$

根据上述定义, 可得

$$\bar{r}_e = r_e \cos \psi_e + \delta_1, \quad (21)$$

其中 $\delta_1 = (r_d - \dot{\psi}_d \cos \theta)(\cos \psi_e - 1)$. 结合式(18)–(21), 对式(17)求导得到

$$\dot{V}_3 = -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - z_e \alpha_{2e} + \frac{\alpha_{1e} v_t}{\cos \theta} (r_e \cos \psi_e + \delta_1). \quad (22)$$

Step 4 构造Lyapunov函数

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2} r_e^2. \quad (23)$$

对上式两边求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - z_e \alpha_{2e} + \left(\frac{\alpha_{1e} v_t \cos \psi_e}{\cos \theta} + \right. \\ & \left. \dot{r}_e \right) r_e + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta}. \end{aligned} \quad (24)$$

控制输入 τ_r 选取为

$$\tau_r = -(m_{11} - m_{22})uv + d_{66}r + m_{66}(\dot{r}_d - \frac{\alpha_{1e} v_t \cos \psi_e}{\cos \theta} - k_6 r_e), \quad (25)$$

其中 k_6 为正常数, 并将上式代入UUV动力学模型式(3)中, 结合式(24)得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - z_e \alpha_{2e} - k_6 r_e^2 + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta}. \end{aligned} \quad (26)$$

Step 5 构造Lyapunov函数

$$V_5 = V_4 + \frac{1}{2} \alpha_{2e}^2. \quad (27)$$

同样, 结合式(10)–(11)可得

$$\dot{\alpha}_{2e} = \dot{v}_p \sin \theta_e + v_p \cos \theta_e (q - \dot{\theta}_d) - \dot{\alpha}_{2d}. \quad (28)$$

为了使 $\dot{V}_5$ 为负, 定义 $\bar{q} = q \cos \theta_e$, 期望值 $\bar{q}_d = q_d + \dot{\theta}_d (\cos \theta_e - 1)$, 选取 q 的期望值为

$$q_d = \dot{\theta}_d + \frac{(z_e - \dot{v}_p \sin \theta_e + \dot{\alpha}_{2d} - k_7 \alpha_{2e})}{v_p}, \quad (29)$$

其中 k_7 为正常数. 考虑到 q_d 也并不是真实的可控变量, 于是定义误差变量

$$q_e = q - q_d, \quad \bar{q}_e = \bar{q} - \bar{q}_d, \quad (30)$$

根据上述定义, 可得

$$\bar{q}_e = q_e \cos \theta_e + \delta_2, \quad (31)$$

其中 $\delta_2 = (q_d - \dot{\theta}_d)(\cos \theta_e - 1)$. 结合式(28)–(31), 对式(27)求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 + q_e \alpha_{2e} v_p \cos \theta_e + \\ & \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2. \end{aligned} \quad (32)$$

Step 6 构造Lyapunov函数

$$V_6 = V_5 + \frac{1}{2} q_e^2. \quad (33)$$

对上式两边求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_6 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 + q_e (\alpha_{2e} v_p \cos \theta_e + \\ & \dot{q}_e) + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2. \end{aligned} \quad (34)$$

控制输入 τ_q 选取为

$$\tau_q = -(m_{33} - m_{11})uw + d_{66}q + m_{55}(\dot{q}_d - \alpha_{2e} v_p \cos \theta_e - k_8 q_e), \quad (35)$$

其中 k_8 为正常数, 并将上式代入UUV动力学模型式(3)中, 结合式(34)得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_6 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 - k_8 q_e^2 + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2. \end{aligned} \quad (36)$$

最终得到系统的误差方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u_e - \frac{k_1 x_e}{e} + r y_e - q z_e, \\ \dot{y}_e = \alpha_{1e} - \frac{k_2 y_e}{e} - r x_e - z_e r \tan \theta, \\ \dot{z}_e = -\alpha_{2e} - \frac{k_3 z_e}{e} + q x_e + y_e r \tan \theta, \\ \dot{u}_e = -x_e - k_4 u_e, \\ \dot{\alpha}_{1e} = -k_5 \alpha_{1e} - y_e + \frac{r_e v_t \cos \psi_e}{\cos \theta} + \frac{v_t \delta_1}{\cos \theta}, \\ \dot{r}_e = -k_6 r_e - \frac{\alpha_{1e} v_t \cos \psi_e}{\cos \theta}, \\ \dot{\alpha}_{2e} = -k_7 \alpha_{2e} + z_e + q_e v_p \cos \theta_e + v_p \delta_2, \\ \dot{q}_e = -k_8 q_e - \alpha_{2e} v_p \cos \theta_e. \end{cases} \quad (37)$$

3.3 稳定性分析(Stability analysis)

为了保证欠驱动UUV空间轨迹跟踪控制器在有界信号输入以及外界环境扰动下的稳定性, 将式(3)所示的UUV动力学模型加入外界扰动力项, 如式(38)所示, 并基于Lyapunov稳定性理论进行稳定性分析:

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{m_{33}}{m_{11}}wq - \frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{\tau_u}{m_{11}} + w_1, \\ \dot{q} = \frac{m_{33} - m_{11}}{m_{55}}uw - \frac{d_{55}}{m_{55}}q - \frac{\rho g \nabla G M_L \sin \theta}{m_{55}} + \frac{\tau_q}{m_{55}} + w_2, \\ \dot{r} = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{66}}uv - \frac{d_{66}}{m_{66}}r + \frac{\tau_r}{m_{66}} + w_3, \end{cases} \quad (38)$$

其中 w_1, w_2, w_3 为有界定常环境扰动. 对应的, 加入环境扰动项的UUV三维轨迹跟踪控制器为下式所示:

$$\begin{cases} \tau_u = m_{11}(-x_e + \dot{u}_d - k_4 u_e - \hat{w}_1) - m_{22}vr + m_{33}wq + d_{11}u, \\ \tau_r = -(m_{11} - m_{22})uv + d_{66}r + m_{66}(\dot{r}_d - \frac{\alpha_{1e} v_t \cos \psi_e}{\cos \theta} - k_6 r_e - \hat{w}_2), \\ \tau_q = -(m_{33} - m_{11})uw + d_{66}q + m_{55}(\dot{q}_d - \alpha_{2e} v_p \cos \theta_e - k_8 q_e - \hat{w}_3), \end{cases} \quad (39)$$

其中 $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ 为对当前环境扰动的估计值. 则对式(33)求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_6 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - \\ & k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 - k_8 q_e^2 + u_e \tilde{w}_1 + r_e \tilde{w}_2 + q_e \tilde{w}_3 + \\ & \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2, \end{aligned} \quad (40)$$

其中 $\tilde{w}_i = w_i - \hat{w}_i, i = 1, 2, 3$.

在不存在外界干扰的理想情况下, 即 $w_i = \hat{w}_i = 0, i = 1, 2, 3$ 时,

$$\begin{aligned} \dot{V}_6 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - \\ & k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 - k_8 q_e^2 + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2. \end{aligned} \quad (41)$$

针对外界非零定常有界扰动情况, 选取Lyapunov函数

$$V_7 = V_6 + \frac{1}{2} k_{d1}^{-1} \tilde{w}_1^2 + \frac{1}{2} k_{d2}^{-1} \tilde{w}_2^2 + \frac{1}{2} k_{d3}^{-1} \tilde{w}_3^2, \quad (42)$$

其中 k_{d1}, k_{d2}, k_{d3} 为正常数. 对上式两边求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_7 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - \\ & k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 - k_8 q_e^2 + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2 + \\ & \tilde{w}_1(u_e + k_{d1}^{-1} \dot{\tilde{w}}_1) + \tilde{w}_2(r_e + k_{d2}^{-1} \dot{\tilde{w}}_2) + \end{aligned}$$

$$\tilde{w}_3(q_e + k_{d3}^{-1} \dot{\tilde{w}}_3). \quad (43)$$

自适应律设计为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{w}}_1 = k_{d1} u_e + \tilde{w}_1, \\ \dot{\tilde{w}}_2 = k_{d2} r_e + \tilde{w}_2, \\ \dot{\tilde{w}}_3 = k_{d3} q_e + \tilde{w}_3, \end{cases} \quad (44)$$

则式(43)可转化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_7 = & -\frac{(k_1 x_e^2 + k_2 y_e^2 + k_3 z_e^2)}{e} - k_4 u_e^2 - k_5 \alpha_{1e}^2 - \\ & k_6 r_e^2 - k_7 \alpha_{2e}^2 - k_8 q_e^2 - k_{d1}^{-1} \tilde{w}_1^2 - k_{d2}^{-1} \tilde{w}_2^2 - \\ & k_{d3}^{-1} \tilde{w}_3^2 + \frac{\alpha_{1e} v_t \delta_1}{\cos \theta} + \alpha_{2e} v_p \delta_2. \end{aligned} \quad (45)$$

定义 $\mathbf{z} = (x_e, y_e, z_e, u_e, \alpha_{1e}, r_e, \alpha_{2e}, q_e, \tilde{w}_1/\sqrt{k_{d1}}, \tilde{w}_2/\sqrt{k_{d2}}, \tilde{w}_3/\sqrt{k_{d3}})^T$, 结合式(45)得到

$$2V_7 = \|\mathbf{z}\|^2. \quad (46)$$

结合式(42)和式(45)得到

$$\dot{V}_7 \leq -2\gamma V_7 + \delta, \quad (47)$$

其中: $\gamma = \min\{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, 1, 1, 1\}$, $\delta = |\alpha_{1e} v_t \delta_1 / \cos \theta + \alpha_{2e} v_p \delta_2|$. 由于 $\alpha_{1e}, \alpha_{2e}, v_t, v_p, \delta_1$ 及 δ_2 均为有界, 所以 δ 有界. 根据参考文献[13]中的比较原理, 得到

$$V_7(t) \leq V_7(0)e^{-2\gamma t} + \frac{\delta}{2\gamma}, \quad (48)$$

$$\|\mathbf{z}(t)\| \leq \|\mathbf{z}(0)\|e^{-\gamma t} + \sqrt{\frac{\delta}{\gamma}}. \quad (49)$$

所以, 适当增大增益 γ 可使闭环跟踪误差收敛到零值附近的一个压缩有界集, 即系统全局渐近稳定.

4 对比与讨论(Comparison and discussion)

为进一步说明本文基于虚拟速度误差变量的反步控制方法, 与传统基于视线法相比具有突出优点, 取相应控制量的表达形式进行理论分析. 本文针对欠驱动UUV的三维轨迹跟踪控制, 通过引入坐标变换, 建立系统误差方程, 定义虚拟速度误差变量 $\alpha_1 = v_p \cos \theta_d \sin \psi_e$ 和 $\alpha_2 = v_p \sin \theta_e$, 将 ψ_e 和 θ_e 转化为虚拟速度变量的间接控制, 最终得到系统的轨迹跟踪控制器如式(39)所示, 这是本文的创新之处. 与文献[17]中基于传统视线法设计的控制器相比, 简化了系统控制器的表达形式, 由于篇幅有限, 在此仅对比分析本文设计的速度虚拟量对应 ψ_e 和 θ_e 的表达形式.

传统基于视线法设计的控制器形式为式(52), 同时, 得到对应 ψ_e 和 θ_e 的误差方程表达式如式(53), 具体见附录. 将上述表达式与本文得到的误差方程式(37)和控制器(39)进行比较, 显然本文简化了系统的误差方程, 而且传统设计方法中的控制量在 $\theta = \pm\pi/2$, $\varpi_1 = 0$ 及 $\varpi_2 = 0$ 时都存在奇异值点, 使得UUV初始跟踪误差受到约束, 得到的控制器无法实现全局收敛

性;虽然本文在 $\theta = \pm\pi/2$ 时同样存在该控制问题,但考虑UUV实际工程应用时,UUV极少出现竖直状态,所以本文给出了合理的假设条件:欠驱动UUV的纵倾角 θ ,满足对 $\forall t \geq 0$,有 $|\theta(t)| < \pi/2$,其次本文避免了传统反步法中 $\varpi_1 = 0$ 及 $\varpi_2 = 0$ 引起控制律的设计存在奇异值情况,解决了UUV初始跟踪误差受到约束的问题,从而实现了欠驱动UUV三维轨迹跟踪控制器的全局收敛。

5 仿真实验与分析(Simulation results and analysis)

仿真实验对象为哈尔滨工程大学研究所自主研发的欠驱动“BSA”UUV,根据实测水动力系数建立仿真模型,对上述研究的欠驱动UUV三维轨迹跟踪反步控制方法进行验证,具体过程如下:

设计时变的正弦空间轨迹为

$$\begin{cases} x_d = t, \\ y_d = 100 \sin(0.01t), \\ z_d = 200 + 100 \sin(0.01t). \end{cases} \quad (50)$$

设欠驱动UUV的初始位置为 $(x, y, z) = (0, 5, 205)$ m,初始姿态角为 $(\theta, \psi) = (-0.1, 0.1)$ rad,初始航速 $(u, v, w) = (0, 0, 0)$ kn.期望UUV的航速 $u_d = v_p = \sqrt{\dot{x}_d^2 + \dot{y}_d^2 + \dot{z}_d^2}$,定常外界环境扰动 $w_1 = -0.5$ N/kg, $w_2 = w_3 = -0.5$ Nm/kg.选取控制增益为 $k_1 = 1, k_2 = 1, k_3 = 1, k_4 = 20, k_5 = 20, k_6 = 10, k_7 = 20, k_8 = 10, k_{d1} = 1, k_{d2} = 1, k_{d3} = 1$.

为了更准确形象地表示UUV三维空间的位置跟踪误差,定义

$$E = \sqrt{x_e^2 + y_e^2 + z_e^2}. \quad (51)$$

如图2所示,UUV实现了对预设三维空间正弦轨迹跟踪,且系统总的位置误差以指数形式收敛到零.图3给出了三维空间正弦轨迹跟踪在3个平动方向上的位置误差分量,从图中可以看到曲线响应平滑,误差渐进收敛,UUV三维空间正弦轨迹的跟踪效果较好。

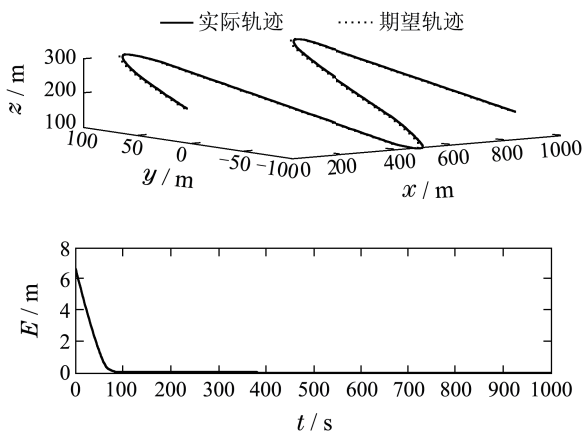


图2 UUV三维空间正弦轨迹跟踪控制效果图

Fig. 2 Three-dimensional sinus trajectory-tracking of UUV

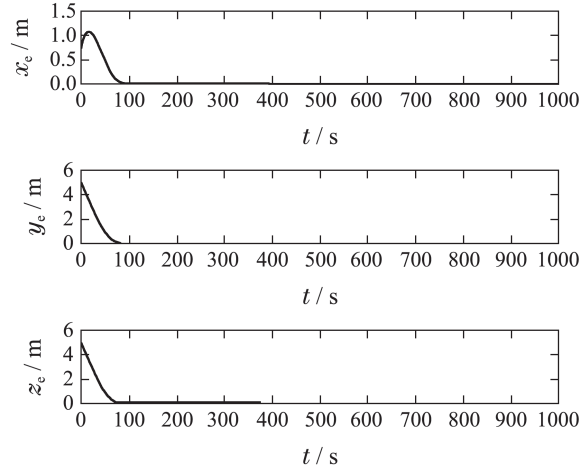


图3 UUV轨迹跟踪的位置误差

Fig. 3 Trajectory tracking errors of UUV

为了更进一步说明UUV的轨迹跟踪效果,图4给出了UUV三维空间正弦轨迹跟踪时的姿态角 ψ 和 θ 的变化情况,从图4中可以看出该方法可以实现UUV三维时变轨迹的姿态跟踪控制。

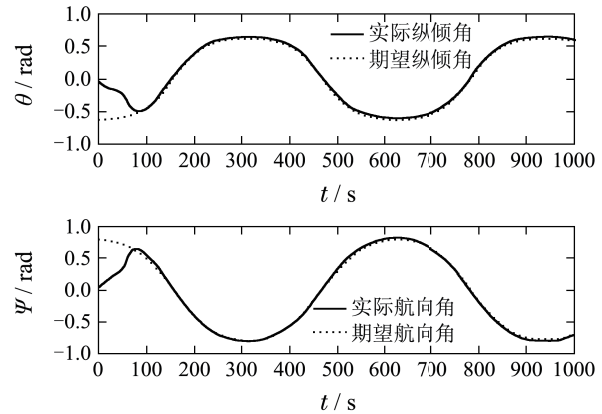


图4 UUV的姿态响应曲线

Fig. 4 Attitude response of UUV

图5给出了UUV三维空间正弦轨迹跟踪时的纵向、横向以及垂向的速度变化情况,从图中可以知道,纵向速度的精确跟踪效果较好,但横向及垂向速度存在一定的误差,其原因如下:为了避免传统的反步法中基于视线法正面设计 ψ_e 和 θ_e 时存在的奇异值问题,本文定义 $\alpha_1 = v_p \cos \theta_d \sin \psi_e$ 和 $\alpha_2 = v_p \sin \theta_e$,合理构造虚拟速度变量,设计UUV轨迹跟踪反步控制器,控制输入 τ_u 和 τ_q 间接实现对横移及垂荡的控制,由于欠驱动控制效果的耦合,必然会导致横移及垂荡速度存在一定的误差,但是从图中可以看出,横向及垂向速度的误差值较小且均收敛.图6给出了UUV三维正弦轨迹跟踪时的航向角速度 r 和纵倾角速度 q 的变化情况,图7给出了UUV控制输入 τ_u, τ_q, τ_r 的变化情况,从图2-7可以看出,本文所提出的欠驱动UUV空间轨迹跟踪反步控制方法收敛、有效,能够实现UUV在定常有界环境扰动下的三维轨迹精确跟踪。

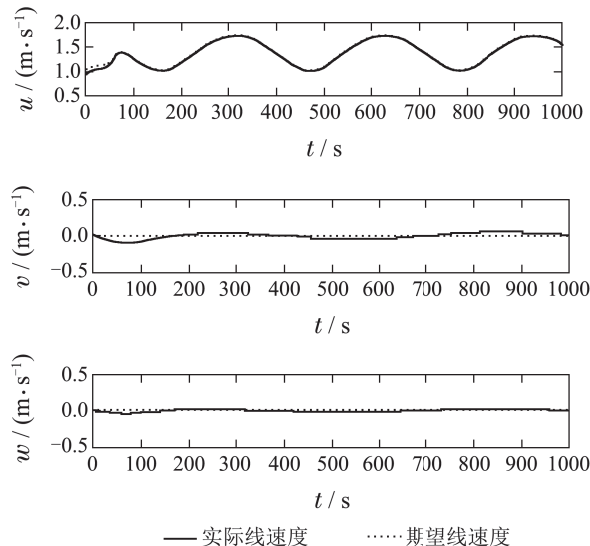


图 5 UUV的线速度响应曲线

Fig. 5 Linear velocity response of UUV

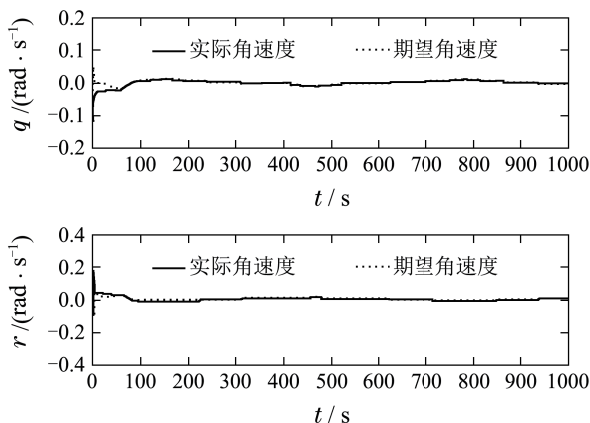


图 6 UUV的角速度响应曲线

Fig. 6 Angular velocity response of UUV

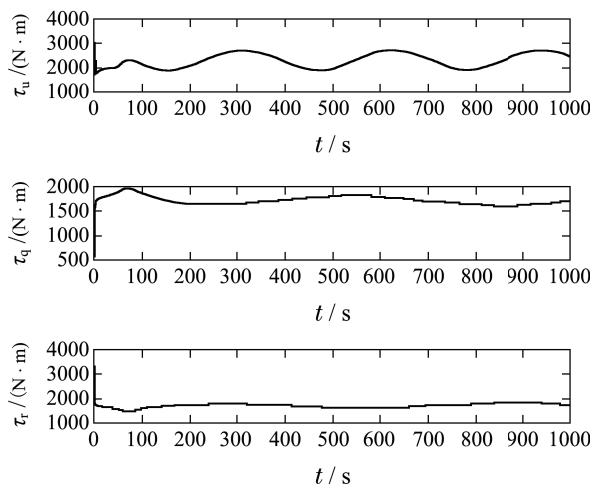


图 7 UUV的控制输入

Fig. 7 Control inputs of UUV

6 结论(Conclusions)

本文针对欠驱动UUV三维轨迹跟踪控制问题,以哈尔滨工程大学“BSA”UUV为研究对象,利用反步

法设计了欠驱动UUV的轨迹跟踪控制器,给出了系统的误差方程,基于Lyapunov稳定性理论证明了系统在定常外界扰动下的鲁棒性和稳定性;本文的创新之处在于有别于传统反步法中基于视线法设计姿态角误差变量的思路,提出了一种定义虚拟速度误差变量的反步控制器设计方法,能够有效避免传统反步法控制律设计时存在的奇异值问题,简化了传统反步法复杂的计算过程,满足了欠驱动UUV三维时变轨迹跟踪对位置、姿态以及速度的时间约束要求;最后,仿真结果表明本文提出的UUV三维轨迹跟踪反步控制方法收敛、有效,能够实现欠驱动UUV对时变轨迹的精确跟踪控制。

参考文献(References):

- [1] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
(JIANG Xinsong, FENG Xisheng, WANG Ditang. *Unmanned Underwater Vehicles* [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2000.)
- [2] 徐玉如, 肖坤. 智能海洋机器人技术进展 [J]. 自动化学报, 2007, 33(5): 518 – 521.
(XU Yuru, XIAO Kun. Technology development of autonomous ocean vehicle [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(5): 518 – 521.)
- [3] WANG Y T, YAN W S, GAO B, et al. Backstepping-based path following control of an underactuated autonomous underwater vehicle [C] // *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Information and Automation*. Zhuhai: IEEE, 2009: 466 – 477.
- [4] 王芳, 万磊, 李晔, 等. 欠驱动AUV的运动控制技术综述 [J]. 中国造船, 2010, 51(2): 227 – 241.
(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 – 241.)
- [5] FOSSEN T I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles* [M]. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
- [6] 俞建成, 张艾群, 王晓辉, 等. 基于模糊神经网络水下机器人直接自适应控制 [J]. 自动化学报, 2007, 33(8): 840 – 846.
(YU Jiancheng, ZHANG Aiqun, WANG Xiaohui, et al. Direct adaptive control for underwater vehicles based on fuzzy neural networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(8): 840 – 846.)
- [7] 俞建成, 李强, 张艾群, 等. 水下机器人的神经网络自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 9 – 13.
(YU Jiancheng, LI Qiang, ZHANG Aiqun, et al. Neural network adaptive control for underwater vehicles [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 9 – 13.)
- [8] 张利军, 贾鹤鸣, 边信黔, 等. 基于干扰抑制的水下机器人三维航迹跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 645 – 651.
(ZHANG Lijun, JIA Heming, BIAN Xinqian, et al. Three dimensional path tracking control for an autonomous underwater vehicle based on L-two disturbance attenuation method [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(5): 645 – 651.)
- [9] 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 – 296.
(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 – 296.)
- [10] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军, 等. 基于离散滑模预测的欠驱动AUV三维航迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1452 – 1458.

- (JIA Heming, CHENG Xiangqin, ZHANG Lijun, et al. Three dimensional path tracking control for an underactuated AUV based on discrete-time sliding mode prediction [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(10): 1452 – 1458.)
- [11] 贾鹤鸣, 张利军, 程相勤, 等. 基于非线性迭代滑模的欠驱动UUV三维航迹跟踪控制 [J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 308 – 314. (JIA Heming, ZHANG Lijun, CHENG Xiangqin, et al. Three dimensional path following control for an underactuated UUV based on nonlinear iterative sliding mode [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 308 – 314.)
- [12] DO K D, PAN J, JIANG Z. Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(16): 1967 – 1997.
- [13] REPOULIAS F, PAPADOPOULOS E. Planar trajectory planning and tracking control design for underactuated AUVs [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(11): 1650 – 1667.
- [14] BI F Y, WEI Y J, ZHANG J Z, et al. Position-tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of unknown ocean currents [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2010, 4(11): 2369 – 2380.
- [15] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军, 等. 基于自适应Backstepping的欠驱动AUV三维航迹跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 652 – 664. (JIA Heming, CHENG Xiangqin, ZHANG Lijun, et al. Three dimensional path tracking control for underactuated AUV based on adaptive backstepping [J]. *Control and Decision*, 2012, 27(5): 652 – 664.)
- [16] 王宏健, 陈子印, 边信黔, 等. 欠驱动水下航行器三维直线航迹跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(4): 443 – 453. (WANG Hongjian, CHEN Ziyin, BIAN Xinqian, et al. Three-dimensional straight line path tracking control for underactuated underwater vehicle [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(4): 443 – 453.)
- [17] DO K D, PAN J. *Control of Ships and Underwater Vehicles* [M]. London: Springer London, 2009.

附录 补充公式(Supplementary formula of appendix)

传统基于视线法设计的控制器形式为

$$\begin{cases} \tau_u = m_{11}(-\rho_1 \tilde{u}_e - \frac{m_{22}}{m_{11}}vr + \frac{m_{33}}{m_{11}}wq + \frac{d_{11}}{m_{11}}(u_{ed} + u_d) + \dot{u}_d + \dot{u}_{ed} + \lambda_1 \varpi_1^{-1} \varpi^{-2} x_e y_e z_1 - \lambda_2 \varpi_2^{-1} \varpi^{-2} x_e z_e z_2), \\ \tau_r = m_{66} - \rho_2 \tilde{r}_e - \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{66}}uv + \frac{d_{66}}{m_{66}}(r_{ed} + r_d) + \dot{r}_d + \dot{r}_{ed} - (1 - \lambda_1 \varpi_1^{-1} (x_e \cos \theta + z_e \sin \theta)) \frac{z_1}{\cos \theta} + \lambda_2 \varpi_2^{-1} y_e z_2 \tan \theta, \\ \tau_q = m_{55}(-\rho_3 \tilde{q}_e - \frac{m_{33} - m_{11}}{m_{55}}uw + \frac{d_{55}}{m_{55}}(q_{ed} + q_d) + \dot{q}_d + \dot{q}_{ed} - (1 - \lambda_2 \varpi_2^{-1} x_e) z_2). \end{cases} \quad (A1)$$

同时, 得到对应 ψ_e 和 θ_e 的误差方程表达式为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -c_1 z_1 + (1 - \lambda_1 \varpi_1^{-1} (x_e \cos \theta + z_e \sin \theta)) \tilde{r}_e \cos \theta^{-1} - \lambda_1 \varpi_1^{-1} \varpi^{-2} x_e y_e \tilde{u}_e, \\ \dot{z}_2 = -c_2 z_2 + (1 - \lambda_2 \varpi_2^{-1} x_e) \tilde{q}_e - \lambda_2 \varpi_2^{-1} y_e \tilde{r}_e \tan \theta + \lambda_2 \varpi_2^{-1} \varpi^{-2} x_e z_e \tilde{u}_e, \\ z_1 = \psi_e + \arcsin \frac{c_1 y_e}{\sqrt{1 + (x_e)^2 + (y_e)^2 + (z_e)^2}}, \\ z_2 = \theta_e - \arcsin \frac{c_2 z_e}{\sqrt{1 + (x_e)^2 + (y_e)^2 + (z_e)^2}}. \end{cases} \quad (A2)$$

作者简介:

徐 健 (1980–), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为水下无人航行器总体优化设计、无人系统自主控制技术, Email: xujian_bsa@hrbeu.edu.cn;

汪 慢 (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为水下机器人控制技术、非线性系统控制理论与应用, Email: 1026809958@qq.com;

乔 磊 (1989–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为非线性系统控制理论及其应用、水下机器人制导与控制, Email: qiaolei2008114106@gmail.com.