

文章编号: 1001-0920(2013)12-1864-05

基于改进主从控制结构的海洋机器人零航速减摇鳍系统

高妍南^{1,2}, 金鸿章², 周生彬³

(1. 黑龙江科技大学 电气与信息工程学院, 哈尔滨 150025; 2. 哈尔滨工程大学
自动化学院, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨师范大学 数学科学学院, 哈尔滨 150025)

摘要: 利用零航速减摇鳍系统实现对海洋机器人在近水面低速航行时的横摇姿态控制. 基于零航速减摇鳍的非线性动态特性和海洋机器人横摇解耦模型, 提出具有主从结构的横摇减摇控制规律. 设计具有积分滑模面的变结构控制规律, 估算系统期望横摇扶正力矩, 并进一步结合非线性跟踪控制理论和反馈线性化方法, 建立减摇鳍子系统模型, 设计从属控制规律驱动减摇鳍产生实际横摇稳定力矩. 仿真结果和理论分析表明, 所设计的控制规律是稳定且有效的.

关键词: 海洋机器人; 零航速减摇鳍; 横摇减摇; 主从结构; 近水面

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

Zero-speed fin stabilizer system of marine robot based on modified master slave control structure

GAO Yan-nan^{1,2}, JIN Hong-zhang², ZHOU Sheng-bin³

(1. College of Electrical and Technology, Heilongjiang Science and Technology University, Harbin 150025, China; 2. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. College of Mathematics, Harbin Normal University, Harbin 150025, China. Correspondent: GAO Yan-nan, E-mail: gyannan82@163.com)

Abstract: The zero-speed fin stabilizer system is used to realize the roll attitude control of marine robot which navigates near sea surface with low speed. Based on the nonlinear dynamic properties of zero speed fin stabilizer and marine robot's decoupling rolling model, the roll damping control law with master-slave structure is designed. The variable structure master controller with the integral sliding mode is proposed to calculate the desired righting moment, and the nonlinear tracking control theory and feedback linearization method are used to design the slave controller, which drives the zero-speed fin stabilizer to generate actual roll stabilizing moment. The simulation results and the theoretical analysis are presented to show the stability and effectiveness of the proposed control law.

Key words: marine robot; zero-speed fin stabilizer; roll damping; master slave structure; near sea surface

0 引言

海洋机器人在近水面航行时, 受波浪力影响将产生摇荡运动, 威胁其正常工作和安全性能^[1]. 结合机器人自身结构的特点, 依据对零航速减摇鳍系统的初步研究^[2-4], 采用一种适用于海洋机器人近水面低速航行时的新型减摇鳍系统, 使机器人在低航速下的横摇姿态得到有效控制. 这种用于零航速以及低航速下的新型减摇鳍装置, 依靠绕鳍轴主动拍水产生横摇扶正力矩, 其水动力特性具有强非线性、多饱和性和约束性, 给机器人横摇减摇控制规律设计带来了极大难度和复杂性.

目前, 针对具有非线性控制输入系统的研究成果较少, 提出的控制策略都是将输入非线性归入系统模型, 再利用具体方法直接求解非线性控制律^[5-8]. 文献[9]提出了具有主从控制结构的零航速减摇鳍控制系统, 利用约束控制算法设计主控制器, 计算出期望的中间变量, 再通过输入非线性的数值反演获得实际的控制作用. 该控制结构虽然解决了系统输入非线性的问题, 但在利用数值反演获得实际控制作用时存在计算负担较大的问题, 不适用于海洋机器人实时控制.

本文基于海洋机器人横摇解耦模型, 结合减摇鳍升力模型, 利用滑模变结构控制理论和非线性跟踪控

收稿日期: 2012-07-24; 修回日期: 2012-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879012).

作者简介: 高妍南(1982-), 女, 讲师, 博士, 从事水下机器人综合减摇技术的研究; 金鸿章(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 从事船舶运动控制及其特辅装置等研究.

制方法, 提出具有改进型主从控制结构的机器人横摇减摇控制策略. 该方法避免直接解决系统非线性控制输入问题, 将由减摇鳍产生的实际控制输入实现问题转换为减摇鳍系统对系统期望控制输入的跟踪控制问题. 同时, 设计的主控制规律具有强鲁棒性, 能够抵消近水面波浪对系统的不确定干扰作用, 实现机器人横摇减摇的实时控制.

1 系统描述

1.1 低航速下的海洋机器人横摇减摇原理

图 1 为低航速下海洋机器人横摇减摇系统原理图. 依据实时测量到的机器人横摇角 ϕ 与期望横摇角 ϕ_d 间的偏差, 在控制系统作用下, 随动系统驱动减摇鳍绕鳍轴主动高速拍水打转, 产生横摇扶正力矩, 以抵消近水面波浪干扰, 控制横摇姿态.

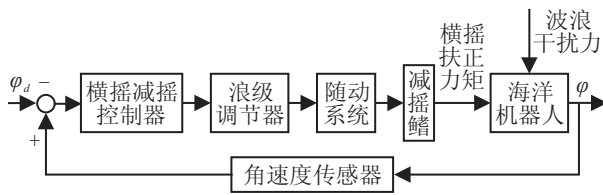


图 1 海洋机器人减摇系统原理

本文采用基于纵向拍动式的零航速减摇鳍升力模型, 鳍型标准为 NACA0025, 展长为 0.25 m, 弦长为 0.5 m, 鳍轴到弦长中点的距离为 0.125 m. 可得零航速模式下的升力模型^[4]为

$$\begin{aligned} F_{\text{zero}} &= (c_1 \omega_f(t) |\omega_f(t)| + c_2 \dot{\omega}_f(t)) \cos(\alpha_f(t)), \\ c_1 &= C_d \rho_w s (5c^3 + 15a^2c + 12a^3e^2) / 15 + \\ &\quad \rho_w \tilde{k} (a+c)(a^2+c^2)s/2, \\ c_2 &= \pi \rho_w s a^2 c. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: ω_f 为翼面转动角速度, α_f 为转鳍角度, c_d 为阻力系数, \tilde{k} 为常数比例因子, ρ_w 为流体密度, $2a$ 为弦长, c 为弦长中点距鳍轴距离, s 为展长, \bar{t} 为最大厚度比, $e = 4\bar{t}/3\sqrt{3}$ ^[4].

当机器人以 1.832 m/s 的速度低速航行时, 令 $\Delta F_{\text{lift}}(v, t)$ 表示具有相对速度的水流经过翼面时对鳍面升力的影响. 经计算, $\Delta F_{\text{lift}}(v, t)$ 占总升力 F_{lift} 的比例约为 3% ~ 4%, 仿真时可近似认为

$$F_{\text{lift}} = F_{\text{zero}}. \quad (2)$$

1.2 近水面波浪干扰力建模

计算近水面波浪干扰力矩, 选取 PM 波谱描述海浪, 由于海洋机器人是在水下 3 ~ 5 m 处航行, 考虑史密斯效应, 受水深影响产生的波动压力差^[1]为

$$\Delta P = -\rho g \xi_a \exp(-kz) \cos(k\xi - \omega t),$$

从而海浪干扰的瞬时横摇力矩^[10]可以表示为

$$\begin{aligned} M_{\text{wave}} &= \sum_{i=1}^N M_{\text{wave}i}(t) = \\ &= -\sum_{i=1}^N C_M L \nabla \rho (1 - 0.02u \cos \gamma) \text{sgn}(\cos \gamma) F_i \cos \omega_{ei} t. \end{aligned} \quad (3)$$

1.3 海洋机器人横摇解耦模型

由海洋机器人 6 自由度运动耦合模型^[11], 略去与升沉和纵倾运动有关的参数, 增添横摇波浪干扰力矩项, 得到水平面运动耦合模型

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & -(mz_G + Y_{\dot{p}}) & -Y_{\dot{r}} \\ -(mz_G + K_{\dot{v}}) & I_x - K_{\dot{p}} & -(I_{xz} + K_{\dot{r}}) \\ N_{\dot{v}} & -(I_{xz} + N_{\dot{p}}) & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \\ u_0 \begin{bmatrix} Y_v & Y_p & Y_r - m \\ K_v & K_p & K_r + m_G \\ N_v & N_p & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M_w + M_{\text{fin}} \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中: v, p, r 分别为横荡速度、横摇角速度和艏摇角速度; u 为海洋机器人航速; m 为海洋机器人质量; W 为水下机器人自重; x_G, y_G, z_G 为相应的海洋机器人重心坐标; I_x, I_y, I_z 分别为绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的转动惯量; I_{xy}, I_{yz}, I_{xz} 分别为海洋机器人质量对 oxy, oyz, oxz 平面的惯性积; $Y_{(\cdot)}, K_{(\cdot)}, N_{(\cdot)}$ 为水动力系数, 选用国际船模试验水池会议 (ITTC) 推荐表示方法^[1]; M_w 为海浪干扰力矩; M_{fin} 为减摇鳍横摇扶正力矩, 且有

$$M_{\text{fin}} = 2F_{\text{lift}} l_f = 2l_f (c_1 \omega_f |\omega_f| + c_2 \dot{\omega}_f) \cos \alpha_f, \quad (5)$$

l_f 为横摇扶正力臂. 代入相应水动力系数, 经过计算和降阶处理, 得到等价二阶横摇模型为

$$G_{\phi}(s) = \frac{0.00016347}{s^2 + 1.2928s + 0.6058}. \quad (6)$$

定义初始条件 $\dot{\phi}(0) = \phi(0) = 0$, 由拉氏反变换得横摇运动方程为

$$\begin{aligned} \ddot{\phi}(t) + 1.2928\dot{\phi}(t) + 0.6058\phi(t) = \\ 0.00016347M_{\text{fin}}(t) + 0.00016347M_w(t). \end{aligned} \quad (7)$$

消除波浪干扰引起的稳态误差, 引入微分方程

$$\dot{\phi}_I = \phi. \quad (8)$$

定义 $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [\phi_I, \phi, \dot{\phi}]^T$, 则海洋机器人横摇运动的动态模型可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(M_{\text{fin}} + M_w), \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.6058 & -1.2928 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.00016347 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

2 海洋机器人横摇减摇控制器设计

由于水动力系数具有不确定性, 横摇减摇控制系统 (9) 可以表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\mathbf{x} + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})(M_{\text{fin}} + M_w). \quad (10)$$

其中: \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为根据船模水池拖拽实验得到的机器人横摇动力学模型中相应的水动力系数标称值; $\Delta\mathbf{A}$ 和 $\Delta\mathbf{B}$ 为相应不确定部分, 且满足如下假设:

- 1) 矩阵 $\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}$ 与 $\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B}$ 维数相匹配;
- 2) 由矩阵 \mathbf{A} , \mathbf{B} 所确定的系统模型完全可控;
- 3) 存在矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$ 满足匹配条件

$$\Delta\mathbf{A} = \mathbf{B}\tilde{\mathbf{A}}, \quad \Delta\mathbf{B} = \mathbf{B}\tilde{\mathbf{B}},$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = (\mathbf{B}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}^T\Delta\mathbf{A}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = (\mathbf{B}^T\mathbf{B})^{-1}\mathbf{B}^T\Delta\mathbf{B}.$$

由此, 式(10)可以改写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(u_d + E(t)). \quad (11)$$

其中: $E(t) = \Delta\mathbf{A}\mathbf{x} + \Delta\mathbf{B}M_{\text{fin}} + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})M_w$ 为系统不确定和外加干扰部分; u_d 为主控制器计算出的系统期望控制输入. 则式(11)可以看作一个具有能控标准型的由非线性执行器驱动的单输入3阶系统.

2.1 滑模变结构主控制器设计

设计系统(11)具有积分型滑模面的变结构主控制规律^[12], 抵消外界的干扰. 由假设1~假设3可知, 系统的不确定性可得到完全的补偿.

令期望横摇角 $\phi_d = 0$, 期望的状态变量 $x_d = [\phi_{Id} \quad \phi_d \quad \dot{\phi}_d]^T = [0, 0, 0]^T$, 状态误差 $\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = \mathbf{x}$. 令滑模面 $\sigma(t)$ 为

$$\sigma(t) = \mathbf{c}' \left[\mathbf{x}(t) - \int_0^t (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{k}^T)\mathbf{x}(t)dt \right]. \quad (12)$$

其中: $\mathbf{c}' = [c'_1 \quad c'_2]^T$, $c'_i (i = 1, 2)$ 为正常数, 满足滑模面系数设计要求; $\mathbf{k} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T$ 为稳定横摇动态的反馈增益矩阵. 当系统状态 $\mathbf{x}(t)$ 处于滑模面上时, 有 $\sigma(t) = \dot{\sigma}(t) = 0$ 成立, 采用等效控制的方法, 对滑模面(12)关于时间 t 取微分可得

$$\dot{\sigma} = \mathbf{c}' [\dot{\mathbf{x}} - (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{k}^T)\mathbf{x}] = \mathbf{c}' \mathbf{B}[u_{eq} - \mathbf{k}^T\mathbf{x}] = 0, \quad (13)$$

则等效控制为

$$u_{eq} = \mathbf{k}^T\mathbf{x}, \quad (14)$$

从而期望横摇稳态力矩为

$$u_d = \mathbf{k}^T\mathbf{x} - \eta \text{sgn}(\sigma(t)). \quad (15)$$

其中 η 为 $E(t)$ 的估计值, 满足

$$\eta \geq |E(t)|. \quad (16)$$

2.2 输出跟踪反馈从属控制器设计

事实上, 系统(10)的实际控制输入为减摇鳍产生的横摇稳定力矩 $M_{\text{fin}}(\alpha_f, \omega_f, \dot{\omega}_f)$. 由零航速减摇鳍的工作机制, 通过控制转鳍角速度 ω_f 产生 M_{fin} , 由此 ω_f 为系统(10)的实际可控输入. 设计针对减摇鳍系统的反馈从属控制器, 并通过扩展子系统的引入, 实现由实际控制输入力矩 M_{fin} 对期望控制输入 u_d 的跟踪,

解决系统非线性控制输入的实现问题.

采用模型参考的方法, 引入子系统模型

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_d \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_2 & -b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix} u_d. \quad (17)$$

选取 b_1, b_2 为适合的正常数, 使得 $y_d(t)$ 可以充分地接近 u_d . 将对 u_d 的跟踪控制转换为对 $y_d(t)$ 的跟踪控制, 令 $x'_1 = \omega_f$, $x'_2 = \dot{\omega}_f$, $\mathbf{x}' = [x'_1 \quad x'_2]^T$, 引入如下减摇鳍扩展子系统实现输出跟踪控制:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}'_1 \\ \dot{x}'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix} u_s,$$

$$y = (c_{f1}|x'_1|x'_1 + c_{f2}x'_2) \cos\left(\int_0^t x'_1 dt\right). \quad (18)$$

其中: a_1, a_2 为正的常系数, 表示转鳍运动规律; y 为减摇鳍产生的实际横摇稳态力矩; u_s 为驱动减摇鳍转动的从属控制规律; $c_{f1} = 2l_f K_1, c_{f2} = 2l_f K_2$. 对 y 关于时间 t 求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{y} &= (c_{f2}\beta u_s + f_2(\mathbf{x}')) \cos\left(\int_0^t x'_1 dt\right) + f_1((\mathbf{x}')), \\ f_1(\mathbf{x}') &= (c_{f1}|x'_1|x'_1 + c_{f2}x'_2) \left(-\sin\left(\int_0^t x'_1 dt\right)\right), \\ f_2(\mathbf{x}') &= (2c_{f1}|x'_1|x'_2 + c_{f2}(-a_1x'_1 - a_2x'_2)). \end{aligned} \quad (19)$$

注意到 $\alpha_f \in [-60^\circ, 60^\circ]$, 由此 $\cos\left(\int_0^t x'_1 dt\right) \neq 0$. 令

$$u_s = \frac{1}{c_2\beta} \left(\frac{\nu - f_1(\mathbf{x}')}{\cos\left(\int_0^t x'_1 dt\right)} - f_2(\mathbf{x}') \right), \quad (20)$$

其中 ν 为待定的新输入, y 与 ν 关系式为

$$\dot{y} = \nu. \quad (21)$$

令 $e = y(t) - y_d(t)$ 为跟踪误差, 设计

$$\nu = \dot{y}_d - k_0 e, \quad (22)$$

其中 k_0 为正常数. 闭环系统的跟踪误差为

$$\dot{e} + k_0 e = 0. \quad (23)$$

该误差系统是指数稳定的, 从而有

$$u_s = \frac{1}{c_{f2}\beta} \left(\frac{\dot{y}_d - k_0(y - y_d) - f_1(\mathbf{x}')}{\cos\left(\int_0^t x'_1 dt\right)} - f_2(\mathbf{x}') \right). \quad (24)$$

因此, 在控制规律 u_s 的作用下, 减摇鳍可产生与期望横摇稳定力矩 u_d 一致的实际横摇稳定力矩 M_{fin} . 式(15)和(24)共同组成了海洋机器人横摇动态系统(10)的横摇减摇控制规律.

3 控制器稳定性

定义具有如下形式的标量函数:

$$V(\mathbf{x}, t) = \sigma^2/2. \quad (25)$$

该函数是正定的, 对 $V(\mathbf{x}, t)$ 关于时间 t 求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma\dot{\sigma} = \sigma(\mathbf{c}'\dot{\mathbf{x}} - (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{k}^T)\mathbf{x}) = \\ &= \mathbf{c}'\mathbf{B}(\sigma E(t) - \eta|\sigma|). \end{aligned} \quad (26)$$

由式(16)可知 $\dot{V} \leq 0$, 从而可知主控制器在系统平衡

点处是稳定的. 另外, 跟踪控制规律(24)的稳定性由降阶系统和内动态共同决定, 由式(19)可知系统(18)相对阶为 1, 则内动态方程为

$$\ddot{x}_1 = -a_2\dot{x}_1 - a_1x_1 + \frac{1}{c_{f_2}} \left(\frac{\dot{y}_d - k_0(y - y_d) - f_1(\mathbf{x}')}{\cos\left(\int_0^t x_1' dt\right)} - f_2(\mathbf{x}') \right). \quad (27)$$

为了判断该内动态的稳定性, 得系统零动态方程为

$$\ddot{x}_1 + a_2\dot{x}_1 + a_1x_1 = 0. \quad (28)$$

由于 a_1, a_2 为正的常系数, 系统(28)是有界输入输出(BIBO)意义下稳定的, 跟踪控制规律 u_s 具有实际意义, 由式(15)和(24)决定的海洋机器人横摇减摇控制规律是稳定的.

4 仿真实验

本文研究对象为 Mark II DOLPHIN 海洋机器人, 对本文提出的横摇控制算法进行仿真实验. 仿真条件如下: 波浪有义波高为 0.88 m, 遭遇角为 90° , 机器人长 5.3 m, 高为 0.5 m, 宽为 1 m, 在距海面 3.5 m 深处以 1.832 m/s 的低速航行. 设定减摇鳍最大转鳍角 $\pm 60^\circ$, 最大转动角速度 $\pm 30^\circ/s$. 系统模型参数不确定部分取值为

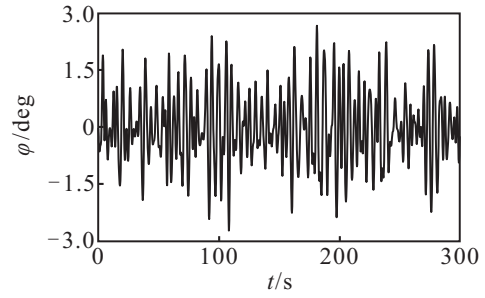
$$\begin{aligned} \Delta m &= 0.04[1 + \sin(0.1t)]m^*, \\ \Delta I_{(\cdot)} &= 0.1[1 + \sin(0.2t)]I_{(\cdot)}^*, \\ \Delta X_{(\cdot)} &= 0.08[1 + \sin(0.2t)]X_{(\cdot)}^*, \\ \Delta Y_{(\cdot)} &= 0.08[1 + \sin(0.2t)]Y_{(\cdot)}^*, \\ \Delta K_{(\cdot)} &= 0.08[1 + \sin(0.2t)]K_{(\cdot)}^*, \\ \Delta N_{(\cdot)} &= 0.08[1 + \sin(0.2t)]N_{(\cdot)}^*. \end{aligned}$$

其中 $m^*, I_{(\cdot)}^*, X_{(\cdot)}^*, Y_{(\cdot)}^*, K_{(\cdot)}^*, N_{(\cdot)}^*$ 为测定的水动力实验数值. 采用式(15)和(24)所示控制规律, 得到用于仿真的主从控制器参数为

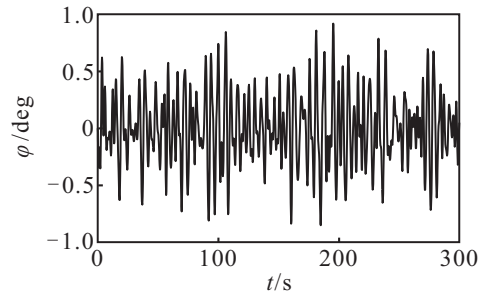
$$\begin{aligned} k_1 &= -2446.9, \quad k_2 = -4156.2, \quad k_3 = -2634.9, \\ c'_1 &= 0.03, \quad c'_2 = 1, \quad \eta = 1500, \quad \beta = 1, \\ b_1 &= 6, \quad b_2 = 36, \quad \alpha_1 = 1, \quad \alpha_2 = 2, \quad k_0 = -6. \end{aligned}$$

对以上仿真结果分析: 在近水面海浪干扰的作用下, 海洋机器人将产生如图 2(a) 所示的横摇运动. 图 2(b) 为在由式(15)和(25)共同决定的横摇减摇控制规律作用下的机器人横摇角响应, 达到了横摇减摇的效果. 图 3 为在主控制规律作用下计算出的期望横摇稳态力矩, 达到了对海洋机器人横摇减摇的目的. 图 4 为在跟踪反馈从属控制器的作用下, 减摇鳍实际产生的横摇稳态力矩. 图 5 为相应实际减摇鳍转鳍角度. 由图 3 和图 4 对比可知, 由于转鳍指令受限于最大转鳍角度和转鳍角速度, 实际横摇稳态力矩与期望横摇稳态力矩间存在偏差, 在一定程度上会降低减摇效果.

如表 1 所示, 所设计的控制器达到了良好的横摇减摇效果, 实现了对海洋机器人横摇运动姿态的控制.



(a) 未加控制时横摇角仿真



(b) 横摇减摇控制下横摇角仿真

图 2 海洋机器人横摇角仿真

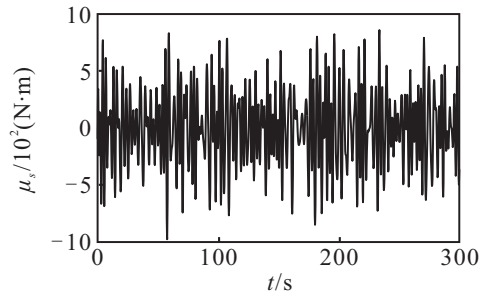


图 3 期望横摇稳态力矩

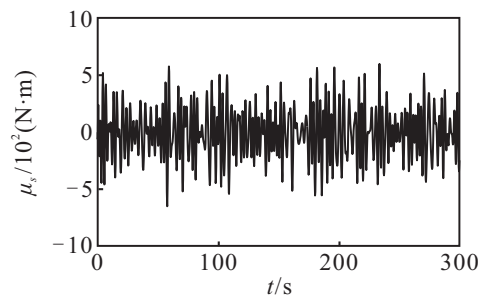


图 4 实际横摇稳态力矩

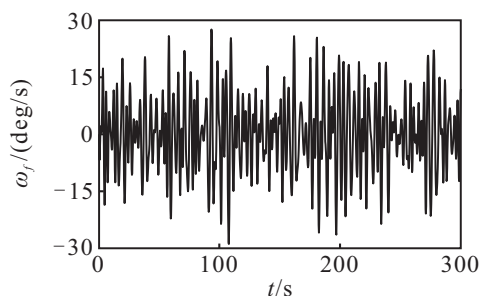


图 5 实际减摇鳍转鳍角速度

表 1 海洋机器人横摇减摇效果统计

遭遇角/(°)	开环横摇角	闭环横摇角	横摇减摇
	准差/(°)	准差/(°)	效果/%
45	0.7523	0.2018	73.18
90	0.9071	0.3040	66.29
135	0.5316	0.1958	63.17

5 结 论

本文结合变结构控制理论和非线性系统跟踪控制理论,设计了基于主从控制结构的海洋机器人横摇减摇控制规律,解决了由于零航速减摇鳍升力模型所引起的系统非线性形式控制输出的设计问题.所设计的控制规律有效控制了机器人在近水面运动时的横摇姿态,并具有良好的动态性能,抑制了由近水面波浪力所产生的外界干扰.

参考文献(References)

- [1] 金鸿章,姚绪梁.船舶控制原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001:30-35.
(Jin H Z, Yao X L. Ship control theories[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001: 30-35.)
- [2] 綦志刚,巩晋,金鸿章.非定常流 Weis-Fogh 机构在零航速减摇中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2008,29(8): 819-824.
(Qi Z G, Gong J, Jin H Z. Unsteady flow weis-fogh mechanism used for roll stabilization at zero speed[J]. J of Harbin Engineering University, 2008, 29(8): 819-824.)
- [3] 金鸿章,张晓飞,罗延明,等.零航速减摇鳍升力模型研究[J].海洋工程,2007,25(3): 83-88.
(Jin H Z, Zhang X F, Luo Y M, et al. Research on lift model of zero speed fin stabilizer[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(3): 83-88.)
- [4] 金鸿章,王帆.零航速仿生减摇鳍水动力模型改进[J].机械工程学报,2010,46(23): 89-92.
(Jin H Z, Wang F. Improving hydrodynamic model for zero speed bionic fin stabilizer[J]. J of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 89-92.)
- [5] Zekri M, Sadri S, Sheikholeslam F. Adaptive fuzzy wavelet network control design for nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(20): 2668-2695.
- [6] Battilotti S, Califano C. A constructive condition for dynamic feedback linearization[J]. Systems & Control Letters, 2004, 52(5): 329-338.
- [7] Hsu Kou-Cheng. Sliding mode control for uncertain nonlinear systems with multiple inputs containing sector nonlinearities and deadzones[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2004, 34(1): 374-380.
- [8] Fliegner T, Logemann H, Ryan E P. Low-gain integral control of continuous-time linear systems subject to input and output nonlinearities[J]. Automatica, 2003, 39(3): 455-462.
- [9] 金鸿章,王帆,马玲,等.零航速减摇鳍两步主从控制律设计[J].自动化学报,2012,38(6): 1059-1064.
(Jin H Z, Wang F, Ma L, et al. Design a two-step master-slave control law for zero-speed fin stabilizers[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(6): 1059-1064.)
- [10] Moreira L, Soares C G. H_2 and H_∞ design for diving and course control of an autonomous underwater vehicle in presence of waves[J]. IEEE J of Ocean Engineering, 2008, 33(2): 69-88.
- [11] Ostafichuk P M. AUV hydrodynamics and modeling for improved control[D]. Vancouver: Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, 2004.
- [12] Cao W J, Xu J X. Nonlinear integral-type sliding surface for both matched and unmatched uncertain systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(8): 1355-1360.