

文章编号: 1001-0920(2011)04-0633-04

## 基于改进积分型变结构控制器的近水面机器人减摇鳍系统

金鸿章<sup>1</sup>, 高妍南<sup>1</sup>, 潘立鑫<sup>1</sup>, 周生彬<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨师范大学 数学科学学院, 哈尔滨 150025)

**摘要:** 海洋机器人在近水面低速航行时, 由于海浪的作用将产生横摇运动. 依据减摇鳍减摇原理和变结构控制理论, 针对海浪波浪力作用的特点, 在水下机器人横摇解耦模型的基础上, 提出一种带有自适应机制的改进积分滑模控制器的设计. 仿真结果表明, 改进后的积分型滑模控制器在消除稳态误差的基础上, 进一步提高了减摇效率.

**关键词:** 机器人; 近水面; 减摇鳍; 积分变结构控制

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

### Fin stabilizer system of underwater vehicle near surface based on modified integral variable structure controller

JIN Hong-zhang<sup>1</sup>, GAO Yan-nan<sup>1</sup>, PAN Li-xin<sup>1</sup>, ZHOU Sheng-bin<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. College of Mathematical Science, Harbin Normal University, Harbin 150025, China. Correspondent: GAO Yan-nan, E-mail: gaoyannan123@yahoo.com.cn)

**Abstract:** When underwater vehicle navigates with low speed near surface, the vehicle has roll motion for the disturbance from wave. According to the principle of zero speed fin stabilizer and variable structure control, modified integral variable structure controller is applied based on coupling roll motion model of autonomous underwater vehicle with the characteristic of wave. The simulation results from simulation experiments show that the modified integral variable structure controller can eliminate the steady-state error and has considerable improvement in performance.

**Key words:** robot; near surface; fin stabilizer; integral variable structure control

## 1 引言

海洋机器人的发展已受到越来越多的关注, 对其提出的性能要求也越来越高. 在执行任务时, 海洋机器人不可避免地要在近水面运动, 这时由于受到海浪及海流的影响, 尤其是在海浪一阶波浪力这种高频周期力的作用下, 海洋机器人将不可避免地产生横摇、纵摇、垂荡等摇荡运动, 这将严重影响机器人的正常工作及安全性能<sup>[1-2]</sup>. 另外, 当海洋机器人低速近水面航行时, 传统的减摇鳍很难产生足够大的升力. 本文依据文献 [3-5] 对零航速减摇鳍系统的初步研究, 采用一种新的减摇控制模式, 使海洋机器人能够在低速下得到有效的减摇.

由得到的海洋机器人解耦后的横摇模型分析可知, 该模型的系统运动方程中的参数具有严重的不确定性, 因此考虑采用鲁棒性较强的变结构控制器进行

控制. 该方法的突出优点在于: 1) 可以采用不精确的数学模型; 2) 可以计入不确定干扰作用的影响; 3) 消除非线性和耦合的影响<sup>[6-8]</sup>. 另外, 考虑到海洋机器人在近水面时还将受到二阶波吸力的作用(它始终指向水表面, 并在很长时间内是一个定值), 这使得系统将出现稳态误差(横摇), 而普通的变结构控制器不能消除稳态误差, 因此考虑积分型变结构控制器<sup>[9]</sup>. 由于海浪干扰力的随机性而无法准确判断干扰控制的范围, 本文设计了具有自适应功能的控制器, 利用自适应优化了变结构控制器参数的选择, 进一步改善了海洋机器人的减摇效果.

## 2 低航速下海洋机器人减摇原理

海洋机器人减摇系统原理如图 1 所示. 在低航速时, 根据海洋机器人的横摇状态, 在控制系统作用下, 随动系统驱动鳍绕鳍轴主动高速打转拍水来产生升

收稿日期: 2010-01-29; 修回日期: 2010-05-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879012).

作者简介: 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; 高妍南(1982-), 女, 博士生, 从事水下机器人综合减摇技术的研究.

力,从而产生扶正力矩以削弱海浪的干扰作用,进行减摇<sup>[4]</sup>.

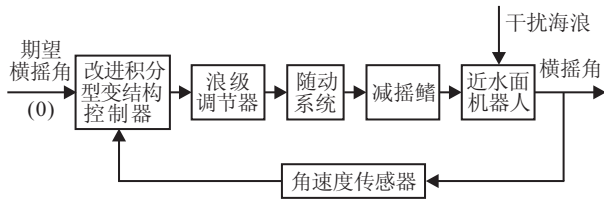


图1 近水面机器人减摇系统原理图

本文研究的海洋机器人横摇模型选自文献[10]. 选用的鳍为: 鳍型IVACA0015, 展长0.25 m, 弦长0.5 m. 海洋机器人以1.832 m/s的航速航行时, 根据理论计算, 传统减摇鳍上产生的升力只有几牛, 不能满足海洋机器人减摇的需求. 本文采用下式所示的基于Weis-Fogh机构的零航速减摇鳍升力模型<sup>[5]</sup>:

$$L_{z\text{ero}} = \{ [A\rho(c-x_0) + 2\pi\rho(c-x_0)(d+x_0)]\dot{\omega} + [4\pi\rho(c-x_0)(d+x_0) + 2A\rho(c-x_0) + (12d^2c + c^3)e\rho m/3]\omega^2 \} \cos(\omega t) = (a_1\omega^2 + a_2\dot{\omega}) \cos(\omega t), \quad (1)$$

使得在这样的低航速下, 也能产生足够的升力以抵消海浪干扰. 其中:  $A$  为翼面表面面积;  $\rho$  为流体密度;  $\omega$  为翼面转动角速度;  $4d$  为弦长;  $c$  为鳍轴到弦长中点的距离;  $e$  为鳍型展长;  $x_0, m, a_1, a_2$  为常数.

本文研究的海洋机器人是在低速下航行, 因此在使用零航速减摇鳍时要考虑相对速度的水流经过鳍翼面时对升力产生的影响. 产生影响的升力不仅与海洋机器人的航速大小有关, 而且随时间变化, 可用  $\Delta L_{\text{lift}}(V, t)$  来表示. 在低航速下, 鳍的升力模型为

$$L_{\text{lift}} = L_{\text{zero}} + \Delta L_{\text{lift}}(V, t).$$

当航速为1.832 m/s时,  $\Delta L_{\text{lift}}(V, t)$  占总升力  $L_{\text{lift}}$  的比例约为3%~4%. 考虑到海洋机器人作业时, 经常在零航速和低航速下工作, 因此仿真时可近似认为

$$L_{\text{lift}} = L_{\text{zero}}.$$

### 3 近水面海浪干扰的计算

海洋机器人在近水面航行时所受波浪力主要是一阶波浪力和二阶波吸力. 本文计算波浪力矩时, 选取Pierson-Moskowitz波谱来描述海浪, 在波浪谱的主要频率范围内对波谱按频率区间宽度为  $\delta\omega$  等分成  $N(N=30)$  个波段, 再将每个成分波的力矩累加, 同时考虑到海洋机器人是在水下  $z$  米处航行, 因此需考虑史密斯效应, 即由于次波面波动幅值受水深影响而产生的波动压力差

$$\Delta P = -\rho g \xi_a e^{-kz} \cos(k\xi - \omega t),$$

进一步得到用于仿真的瞬时横摇力矩<sup>[1]</sup>.

## 4 改进积分型变结构控制器的设计

### 4.1 海洋机器人横摇解耦模型

在海洋机器人运动耦合模型基础上, 略去与升沉和纵倾运动有关的参数, 在横摇运动方程中增添波浪干扰力矩项, 得到水平面运动耦合模型为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f + M_{\text{wave}} + M_{\text{fin}} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= m - \frac{1}{2}\rho L^3 Y'_v, & a_{12} &= mZ_G - \frac{1}{2}\rho L^4 Y'_p, \\ a_{13} &= -\frac{1}{2}\rho L^4 Y'_r, & a_{21} &= mZ_G - \frac{1}{2}\rho L^3 K'_v, \\ a_{22} &= I_x - \frac{1}{2}\rho L^5 K'_p, & a_{23} &= -\frac{1}{2}\rho L^5 K'_r, \\ a_{31} &= -\frac{1}{2}\rho L^4 N'_v, & a_{32} &= -(I_{XZ} + \frac{1}{2}\rho L^5 N'_p), \\ a_{33} &= I_Z - \frac{1}{2}\rho L^5 N'_r, & b_{11} &= -\frac{1}{2}\rho L^3 Y'_v, \\ b_{12} &= -\frac{1}{2}\rho L^3 Y'_p, & b_{13} &= -\frac{1}{2}\rho L^3 Y'_r - m, \\ b_{21} &= \frac{1}{2}\rho L^3 K'_v, & b_{22} &= \frac{1}{2}\rho L^4 (K'_p + K'_{pn}\varepsilon(n)), \\ b_{23} &= \frac{1}{2}\rho L^4 K'_r - mZ_G, & b_{31} &= \frac{1}{2}\rho L^3 N'_v, \\ b_{32} &= \frac{1}{2}\rho L^4 N'_p, & b_{33} &= \frac{1}{2}\rho L^4 N'_r, \\ f &= -z_G W \phi. \end{aligned}$$

$v, p, r$  分别为横荡速度、横摇角速度和艏摇角速度;  $u$  为机器人航速;  $m$  为机器人质量;  $W$  为机器人自重;  $x_G, y_G, z_G$  分别为  $x, y, z$  轴上海洋机器人的重心坐标;  $I_x, I_y, I_z$  分别为绕  $x, y, z$  轴的转动惯量;  $I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}$  分别为海洋机器人质量对  $xoy, yoz, xoz$  平面的惯性积;  $X_{(\cdot)}, y_{(\cdot)}, Z_{(\cdot)}, K_{(\cdot)}, M_{(\cdot)}, N_{(\cdot)}$  为水动力系数, 选用了ITTC推荐的表示方法, 其含义可见文献[1];  $M_{\text{wave}}$  为海浪干扰力矩;  $M_{\text{fin}}$  为零航速减摇鳍横摇扶正力矩, 且

$$M_{\text{fin}} = 2L_{\text{lift}} \cdot l_f = 2l_f(a_1\omega^2 + a_2\dot{\omega}) \cos(\omega t),$$

$l_f$  为横摇扶正力臂, 其他符号含义可参阅文献[4].

对式(2)进一步化简, 并经过线性化及拉氏变换, 可得到横摇的等价模型为

$$\phi(s) = f_{22}(M_{\text{fin}} + M_{\text{wave}}).$$

代入文献[10]中的海洋机器人相应水动力系数, 经过计算并对高阶模型进行降阶, 得到等价二阶横摇模型为

$$f_{22} = \frac{0.000\ 164\ 37}{s^2 + 1.292\ 8s + 0.605\ 8}$$

考虑初始条件  $\dot{\phi}(0) = \phi(0) = 0$ , 进行拉氏反变换, 可得横摇运动方程为

$$\ddot{\phi}(t) + 1.192\ 8\dot{\phi}(t) + 0.605\ 8\phi(t) = 0.000\ 164\ 37M_{\text{fin}}(t) + 0.000\ 163\ 47M_{\text{wave}}(t). \quad (3)$$

将上式转化为状态空间的形式

$$\dot{X} = AX + B(U + W). \quad (4)$$

其中:  $X = (\phi, \dot{\phi})^T$ ;  $U$  为控制力矩, 等同于  $M_{\text{fin}}$ ;  $W$  为海浪干扰力矩, 等同于  $M_{\text{wave}}$ ;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.605\ 8 & -1.292\ 8 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.000\ 163\ 47 \end{bmatrix}.$$

引入一个新的微分方程

$$\dot{\phi}_I = \phi. \quad (5)$$

由式(4)和(5), 得扩展后的系统方程为

$$\dot{X}' = A'X' + B'(U + W), \quad (6)$$

$$X' = \begin{bmatrix} \phi_I \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.605\ 8 & -1.292\ 8 \end{bmatrix},$$

$$B' = (0\ 0\ 0.000\ 163\ 47)^T.$$

新的系统方程引入了状态变量的积分形式, 从而可以实现积分型变结构控制器的设计.

## 4.2 积分型变结构控制器设计

在系统状态误差空间中定义滑动面, 目的是使每个控制输入都能保证状态误差的全局稳定性及在闭环系统下保证良好的性能. 由此定义的滑动面使得从任何一点开始, 系统的状态运动轨线均能在有限时间内到达时变的曲面, 然后沿曲面以指数滑动到指令状态. 状态误差定义为

$$X_e = X' - X_R,$$

其中  $X_R = (0\ 0\ 0)^T$  为横摇指令. 设计切换函数为

$$s = CX_e, \quad (7)$$

其中  $C$  为正常数构成的矩阵.

设系统进入滑动模态后的等效控制为  $u_{\text{eq}}$ , 由上式有

$$\dot{s} = C(\dot{X}' - \dot{X}_R) = C\dot{X}' = C(AX' + B'u_{\text{eq}}) = 0. \quad (8)$$

已知矩阵  $[CB']$  满秩, 故可解出等效控制

$$u_{\text{eq}} = -[CB']^{-1}CA'X'. \quad (9)$$

由于系统存在海浪干扰, 为保证系统状态在有限时间内到达滑模面, 令

$$U = u_{\text{eq}} + u_{\text{vss}} = KX' - f * \text{sgn}(s). \quad (10)$$

当系统处于切换面上时, 系统状态方程为

$$\dot{X}' = (A' + B'K)X'(t). \quad (11)$$

此时通过设计状态反馈增益矩阵可达到理想的控制效果, 并进一步确定了参数的取值.

## 4.3 自适应机制的引入

在实际的控制中, 海浪干扰力矩是随机变量, 因此对于上述控制器的参数  $f \geq |W|$ ,  $W$  的上界很难得到. 为此, 采用自适应控制方法实现对  $W$  上界的自适应估计. 由系统方程(6), 假设  $\bar{r}$  为  $W$  的上界,  $|W| \leq \bar{r}$ ,  $\hat{r}$  为  $W$  上界的估计值, 则控制器规律可设计为

$$U(t) = KX' - \hat{r} \text{sgn}(s(t)). \quad (12)$$

其中自适应律为

$$\dot{\hat{r}} = \frac{1}{a}|s(t)CB'|, \quad (13)$$

$a$  为自适应项的增益且  $a > 0$ . 显然控制器设计是稳定的. 事实上, 定义 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}a\tilde{r}(t)^2, \quad (14)$$

其中  $\tilde{r}(t) = \hat{r} - \bar{r}$ . 则有

$$\begin{aligned} \dot{s} &= C\dot{X}'_e = C\dot{X}' = C(AX' + B'U + B'W) = \\ &C(A'X' + B'KX' - B'f \text{sgn}(s) + B'W) = \\ &CB'(W - \hat{r} \text{sgn}(s(t))), \end{aligned} \quad (15)$$

$$a\tilde{r}\dot{\hat{r}} = a\tilde{r}\frac{1}{a}|sCB'| = \tilde{r}|sCB'| = CB'(\hat{r} - \bar{r})|s|. \quad (16)$$

由式(13), (14)知

$$\begin{aligned} \dot{V} &= CB'(sW - \hat{r}|s|) + CB'(\hat{r} - \bar{r})|s| = \\ &CB'(sW - \bar{r}|s|) \leq 0, \end{aligned} \quad (17)$$

从而有  $\dot{V} \leq 0$ . 即当  $t \rightarrow \infty$  时, 有  $s \rightarrow 0$ , 且  $t \rightarrow \infty$  时  $X' \rightarrow 0$ .

## 5 仿真研究

为验证改进积分变结构控制器的有效性, 对海洋机器人的横摇运动进行仿真研究. 海洋机器人全长 5.3 m, 高 0.5 m, 宽 1 m, 在距海面 10.5 m 深处以 1.832 m/s 的低速航行. 机器人受到有义波高  $H_s$  为 1.5 m, 遭遇角  $\beta$  为  $90^\circ$  的海浪干扰. 减摇鳍的参数为: 展长 0.25 m, 弦长 0.5 m, 鳍轴到弦长中点的距离为 0.125 m. 采用式(10)所示控制规律, 按照极点配置的方法选取如下参数:

$$K = [-9\ 706 \quad -89\ 076 \quad -8\ 700],$$

$$a = 1\ 000, C = [1 \quad 0.03 \quad 1].$$

采用不同方法进行仿真, 所得结果如图 2~图 4 所示. 表 1 给出了不同遭遇角下各种方法的减摇效果.

对以上仿真结果进行分析. 长峰波海浪是一个零均值, 具有各态历经的正态平稳随机过程. 海洋机器人在长峰波中的线性横摇运动是一个零均值的平稳随机过程, 不会出现横倾, 即稳态误差. 而当海洋机器人在近水面时, 由于二阶波吸力对海洋机器人的持续

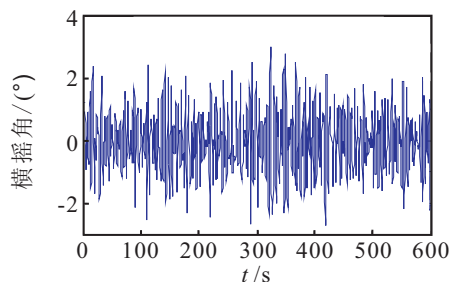


图2 未减横摇时的仿真曲线

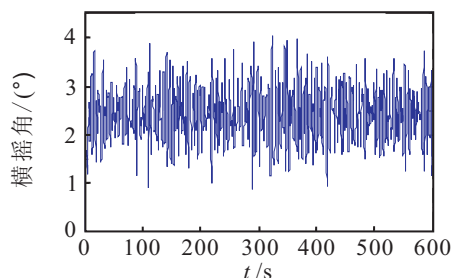


图3 变结构控制仿真曲线

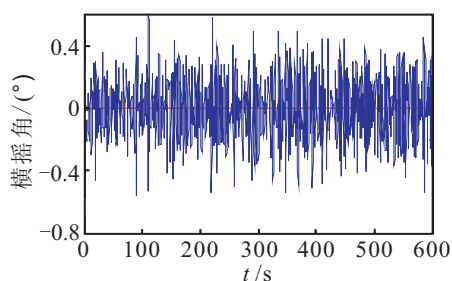


图4 改进积分变结构控制仿真曲线

表1 减摇效果统计

遭遇角/(°)	开环横摇角标 准差/(°)	VSC横摇角标 准差/(°)	MIVSC横摇角标 准差/(°)	VSC横摇减 摇效果/%	MIVSC横摇减 摇效果/%
45	0.7828	0.1413	0.1372	81.95	82.47
90	0.9329	0.2168	0.1952	76.87	79.08
135	0.5686	0.576	0.1419	72.44	75.04

向上的吸力作用,其所受到的波浪力均值不为零,系统不可避免地将产生稳态误差.由图2~图4可知,当有义波高为1.5 m,遭遇角为90°时,改进积分型变结构控制器具有较好的减摇效果,稳态误差得到了明显的减少;而在普通变结构控制器的控制下,系统将无法克服稳态误差.从表1中可以看出,引入自适应机制后,由于考虑了波浪力的随机特性,优化了控制器参数的设定,从而使系统的减摇效果得到了进一步的提高.

## 6 结论

本文利用改进积分型变结构控制器的设计思想设计了近水面机器人横摇控制系统,解决了由于机器人运动模型的不确定性及其外界干扰对系统设计造成的困难,所设计的控制器减少了由二阶波浪力引起的

横倾现象,并且对机器人在近水面时所受到的干扰具有很强的抑制作用和良好的动态性能.仿真结果表明该控制器是有效且可行的.

## 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.  
(Jin H Z, Yao X L. Ship control theories[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001.)
- [2] Roberts G N. Trends in marine control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(2): 263-269.
- [3] 罗延明.船舶零航速减摇鳍及其电动伺服系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2007.  
(Luo Y M. Research on fin stabilizers at zero speed and its electro-servo system for ship[D]. Harbin: School of Automation, Harbin Engineering University, 2007.)
- [4] 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.)
- [5] 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.)
- [6] 熊华胜,边信黔,施小成.积分变结构控制原理在AUV航向控制中的应用仿真[J].船舶工程,2005,27(5): 30-33.  
(Xiong H S, Bian X Q, Shi X C. Simulation of AUV heading control system using integral variable structure control principle[J]. Ship Engineering, 2005, 27(5): 30-33.)
- [7] Anthony J Healey, David Lienard. Multivariable sliding-mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles[J]. Ocean Engineer, 1993, 18(3): 327-339.
- [8] Fang Ming-chung, Luo Jih-hong. On the track keeping and roll reduction of the ship in random waves using different sliding mode controllers[J]. Ocean Engineer, 2007, 34(3/4): 479-488.
- [9] Juan Shi. Design of sliding mode autopilot with steady-state error elimination for autonomous underwater vehicles [C]. Proc of TENCON 2006. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2006: 1-4.
- [10] Peter Michael Ostafichuk. AUV hydrodynamics and modeling for improved control[D]. Vancouver: Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, 2004.