

# 喷水推进型无人艇航向跟踪的反步自适应滑模控制\*

廖煜雷, 庞永杰, 庄佳园

(哈尔滨工程大学 水下智能机器人技术国防科技重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对单泵喷水推进型无人滑翔艇的航向跟踪非线性系统, 提出了一种反步自适应滑模控制方法。该系统由无人艇运动非线性响应模型和舵机伺服系统组成, 并考虑运动响应模型的建模误差、外界干扰力等非匹配不确定性, 利用全局微分同胚坐标变换将原系统变换为具有下三角特征的非线性系统。基于 Backstepping 方法和滑模控制理论, 提出了一种自适应滑模控制律; 利用 Lyapunov 函数, 证明该控制律保证了航向跟踪系统的全局渐近稳定性。仿真对比结果验证了所提出控制器的有效性。

**关键词:** 无人艇; 航向控制; 滑模控制; Backstepping 法; 喷水推进

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0082-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.022

## Backstepping adaptive sliding mode control for unmanned surface vessel course tracking with water-jet-propelled

LIAO Yu-lei, PANG Yong-jie, ZHUANG Jia-yuan

(National Key Laboratory of Science & Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This paper presented a method of Backstepping adaptive sliding mode control for the course tracking nonlinear system of the unmanned hydroplane with single water-jet-propelled. The autopilot system consisted of the nonlinear ship response model and the rudder actuator dynamics. The motion response model took account of the modeling errors and external disturbances. It transformed the original system into a nonlinear system based on global diffeomorphism change of coordinate. And proposed an adaptive sliding mode control law based on sliding mode control theory and Backstepping method. By means of Lyapunov function, it proved that the proposed control law could render the course tracking system globally asymptotically stable. Simulations results illustrate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** unmanned surface vehicle; course control; sliding mode control; Backstepping method; water-jet-propelled

无人水面艇(USV), 简称无人艇, 是一种自主式的无人水面小型船舶, 该 USV 是配备单泵喷水推进器的刚性充气滑翔艇。在不同航速下, 艇体各种水动力系数将随航速的变化而改变, 即该 USV 具有非线性、不确定性和时变性的特点; 同时, USV 在航行中受风、浪、流等海洋环境干扰力的影响较大, 要建立精确的 USV 动力学模型非常困难。综上所述, 控制算法必须对控制系统模型参数的变化具有良好自适应性。设计具有自适应性的自动驾驶操舵系统对实现 USV 的自主航行显得非常重要。

目前, 船舶航向系统的非线性控制方法主要有自适应控制<sup>[1]</sup>、现代鲁棒控制<sup>[2]</sup>、滑模变结构控制<sup>[3]</sup>、Backstepping 法<sup>[4-6]</sup>、基于人工智能和上述方法的混合控制策略等<sup>[7,8]</sup>。上述文献中, 文献[3,5,8]中没有考虑到外界干扰力的影响; 文献[4,6]均没有考虑舵机伺服系统特性对航向系统的作用。在 USV 控制方面, Yu 等人将鲁棒控制方法应用到 USV 的艏向控制中<sup>[9,10]</sup>; Bao 等人针对 USV 的艏向和横向控制问题, 基于滑模观测器和滑模控制器设计了艏向和横向联合控制器<sup>[11]</sup>。文献[12]利用 Lyapunov 直接法和 Backstepping 方法设计了 USV 的速度和艏向联合控制器。

本文讨论了 USV 在未知不确定性影响下的航向跟踪控制问题。首先, 利用全局微分同胚坐标变换, 将原系统变为具有下三角结构特性的非线性系统, 以便于 Backstepping 设计; 然后, 基于 Backstepping 法和滑模控制理论, 提出了一种反步自适应滑模反馈控制律, 设计过程表明, 该控制律能保证 USV 航向跟踪系统的全局渐近稳定性。

### 1 系统描述

在自动操舵系统设计中, 考虑建模误差和环境干扰力等非匹配不确定性的影响, 船舶航向非线性操纵系统可以采用一阶非线性船舶响应方程<sup>[13]</sup>。同时, 考虑舵机伺服系统的特性, 则船舶航向控制问题可描述为

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{r} = -\frac{1}{T}r - \frac{\alpha}{T}r^3 + \frac{K}{T}\delta + F \\ \dot{\delta} = -\frac{1}{T_E}\delta + \frac{K_E}{T_E}\delta_E \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\psi$  为艏向角(顺时针为正);  $r$  为艏摇角速度;  $T$  为时间常数;  $K$  为回转性指数;  $\alpha$  为模型非线性项系数;  $\delta$  为实际舵角(右

收稿日期: 2011-05-09; 修回日期: 2011-06-23      基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61004008)

作者简介: 廖煜雷(1985-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要研究方向为无人艇运动控制和欠驱动无人艇控制(liaoyulei@hrbeu.edu.cn); 庞永杰(1955-), 男, 黑龙江人, 教授, 博导, 主要研究方向为水下机器人总体设计与运动控制技术; 庄佳园(1985-), 男, 黑龙江人, 博士研究生, 主要研究方向为无人艇路径规划和运动控制。

舵为正),  $\delta_e$  为控制舵角;  $F$  为建模误差  $\Delta$  和未知环境干扰力  $\omega$  的不确定性影响总和, 即  $F = \Delta(\psi, \dot{\psi}) + \omega$ , 假设不确定性的上界为  $|F| \leq \bar{F}$ , 且  $F$  为慢变过程  $\dot{F} = 0$ ;  $T_E$  为舵机时间常数;  $K_E$  为舵机控制增益。

2010 年 5 ~ 7 月, 某型 USV 在山东省蓬莱海域进行了大量的直航、回转和 Z 型机动等操纵性实验, 如图 1 所示。对实验数据进行系统辨识得到了艇体操纵性参数为:  $K = -2.364$ ,  $T = 5.489$ ,  $\alpha = 0.000094$ 。

由于 USV 的动力装置为喷水推进器, 可通过改变喷嘴转角来进行艏向控制(对喷嘴转角的操纵, 按习惯也称为舵角操纵), 因此该 USV 比常规的操舵系统具有更好的操纵性能。与常规水面船舶相比, 以“育龙”号实习船<sup>[3]</sup>  $K = -0.42$ ,  $T = 216.73$ ; 某船模<sup>[7]</sup>  $K = -0.95$ ,  $T = 10.31$ ; “育鲲”号实习船<sup>[6]</sup>  $K = -0.26$ ,  $T = 50.43$  为例。该艇  $T$  较小, 因此具有较好的稳定性; 而  $K$  较大, 所以回转性能也较好。可见该 USV 具有良好的机动性能, 这是由艇型和操舵方式决定的。

USV 控制问题可正式描述为: 考虑不确定的影响下, 设计自适应反馈控制律, 保证 USV 航向控制系统的跟踪误差收敛到零。

## 2 反步自适应滑模控制器设计

### 2.1 模型变化

为便于控制器设计, 考虑对系统式(1)的状态做如下的全局微分同胚坐标变换<sup>[14]</sup>, 并令  $u = \delta_e$ ,  $a_1 = -1/T$ ,  $a_2 = -\alpha/T$ ,  $a_3 = K/T$ ,  $a_4 = -1/T_E$ ,  $b = K_E/T_E$ 。

$$\begin{cases} x_1 = \psi \\ x_2 = r \\ x_3 = \dot{r} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 得到一个新的系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = f_1 + F_1 + b_1 u \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $f_1 = (3a_2x_2^2x_3 - a_1a_4x_2 - a_2a_4x_2^3) + (a_1 + a_4)x_3$ ;  $F_1 = -a_4F$ ,  $|F_1| \leq a_4\bar{F}$ ,  $b_1 = a_3b$ 。

显然航向非线性系统式(1)和变化后的系统式(3)微分同胚, 如果  $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = x_{id}$  ( $i = 1, 2, 3$ ), 则当  $t \rightarrow \infty$  时,  $(\psi, r)$  同样收敛到期望值  $(\psi_d, r_d)$ 。航向跟踪控制问题转变为设计控制律  $u$ , 保证式(3)的状态跟踪误差收敛到零。可见式(3)是具有下三角结构特性的非线性系统, 因此可以进行 Backstepping 设计。

### 2.2 反步自适应滑模控制器设计

**定理 1** 考虑存在不确定性影响的控制系统(式(3)), 在自适应反馈控制律(式(23)), 不确定性自适应控制律(式(24))的作用下, 误差变量  $(z_1, z_2, z_3)$  全局渐近收敛到零, 即保证了式(3)的全局渐近稳定性, 从而实现了 USV 航向控制系统式(1)的全局渐近镇定。

**证明** 将  $x_2$  作为子系统  $\dot{x}_1 = x_2$  的控制变量, 定义如下误差变量:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - \psi_d \\ z_2 = x_2 - \dot{\psi}_d - \chi_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\psi_d$  为期望艏向角, 满足 3 阶可导的光滑函数;  $\chi_1$  为虚拟

控制输入, 选择  $\chi_1 = -c_1z_1$ ,  $c_1$  为正常数。由  $\dot{x}_1 = x_2$ ,  $\dot{z}_1$  子系统可写为

$$\dot{z}_1 = z_2 + \dot{\psi}_d + \chi_1 - \dot{\psi}_d = -c_1z_1 + z_2 \quad (5)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (6)$$

对  $V_1$  求导, 则

$$\dot{V}_1 = z_1(\chi_1 + z_2) = -c_1z_1^2 + z_1z_2 \quad (7)$$

如果  $z_2 = 0$ , 则  $\dot{V}_1 \leq 0$ , 为此需要进行下一步设计。将  $x_3$  作为子系统  $\dot{x}_2 = x_3$  的控制变量, 定义误差变量

$$z_3 = x_3 - \dot{\psi}_d - \chi_2 \quad (8)$$

其中:  $\chi_2$  为虚拟控制输入。由  $\dot{x}_2 = x_3$ ,  $\dot{z}_2$  子系统可写为

$$\dot{z}_2 = -c_1^2z_1 + c_1z_2 + z_3 + \chi_2 \quad (9)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (10)$$

选择虚拟控制输入  $\chi_2$  如下:

$$\chi_2 = (c_1^2 - 1)z_1 - (c_1 + c_2)z_2 \quad (11)$$

其中  $c_2$  为正常数。对  $V_2$  求导可得

$$\dot{V}_2 = -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 \quad (12)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (13)$$

其中  $\sigma$  为滑模切换函数, 定义切换函数为

$$\sigma = k_1z_2 + z_3 \quad (14)$$

其中  $k_1$  为正常数。对  $V_3$  求导有

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \sigma \dot{\sigma} = & -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 + \sigma \times \\ & [k_1(z_3 - z_1 - c_1z_2) + f_1 + F_1 + b_1u - \ddot{\psi}_d - \dot{\chi}_2] \end{aligned} \quad (15)$$

取反馈控制律为

$$\begin{aligned} u = b_1^{-1} \{ & \ddot{\psi}_d - k_1(z_3 - z_1 - c_1z_2) - f_1 - \\ & \bar{F}_1 \operatorname{sgn}(\sigma) + \dot{\chi}_2 - h[\sigma + \beta \operatorname{sgn}(\sigma)] \} \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $h, \beta$  皆为正常数。将式(16)代入式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 \leq & -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 + |\sigma|(|F_1| - \bar{F}_1) - h\sigma^2 - h\beta|\sigma| \leq \\ & -c_1z_1^2 - c_2z_2^2 + z_2z_3 - h\sigma^2 - h\beta|\sigma| \end{aligned} \quad (17)$$

取矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} c_2 + hk_1^2 & hk_1 - 1/2 \\ hk_1 - 1/2 & h \end{bmatrix} \quad (18)$$

由于

$$\begin{aligned} Z^T Q Z = [z_2 \quad z_3] & \begin{bmatrix} c_2 + hk_1^2 & hk_1 - 1/2 \\ hk_1 - 1/2 & h \end{bmatrix} [z_2 \quad z_3]^T = \\ & (c_2 + hk_1^2)z_2^2 + (2hk_1 - 1)z_2z_3 + hz_3^2 \end{aligned} \quad (19)$$

其中,  $Z = [z_2 \quad z_3]^T$ 。则当  $|Q| = h(c_2 + k_1) - 1/4 > 0$  时, 式(19)有

$$\dot{V}_3 \leq -c_1z_1^2 - Z^T Q Z - h\beta|\sigma| \leq 0 \quad (20)$$

只要选取  $h, c_2, k_1$  来使  $|Q| > 0$ , 保证  $Q$  为正定矩阵, 则必有  $V_3 \leq 0$  成立。也就保证了系统(式(3))是 Lyapunov 意义下全局渐近稳定的。

USV 航态复杂多变, 这导致航向非线性系统的操纵模型参数很难精确获得且具有较大不确定性; 同时, 航行于复杂海洋环境中的 USV 还受到未知外界环境干扰力的影响。因此,

总不确定性  $F$  的上界  $\bar{F}$  很难确定。为了避免  $F$  上界带来的抖振等问题<sup>[15]</sup>, 采用自适应算法对  $F$  进行估计。

设  $\hat{F}_1$  为  $F_1$  的估计值, 估计误差  $\tilde{F}_1 = F_1^* - \hat{F}_1$ 。定义 Lyapunov 函数为

$$V_4 = V_3 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{F}_1^2 \tag{21}$$

其中  $\gamma$  为正常数。对  $V_4$  求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 - \frac{1}{\gamma} \tilde{F}_1 (\dot{\tilde{F}}_1 - \gamma \sigma) + \\ & \sigma [k_1 \dot{z}_2 + f_1 + \hat{F}_1 + b_1 u - \dot{\chi}_2 - \ddot{\psi}_d] \end{aligned} \tag{22}$$

设计自适应反馈控制律为

$$\hat{u} = b_1^{-1} [\ddot{\psi}_d - k_1 \dot{z}_2 - f_1 - \hat{F}_1 + \dot{\chi}_2 - h(\sigma + \beta \text{sgn}(\sigma))] \tag{23}$$

如令  $F_1$  的自适应律为

$$\dot{\tilde{F}}_1 = \gamma \sigma \tag{24}$$

将式(23)(24)代入式(22), 且由式(19)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_4 = & -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 - h\sigma^2 - h\beta |\sigma| = \\ & -c_1 z_1^2 - Z^T QZ - h\beta |\sigma| \leq 0 \end{aligned} \tag{25}$$

Backstepping 法是一种由前向后递推的反演设计方法, 通过逐步迭代设计 Lyapunov 函数使系统的误差为指数渐近稳定, 最终实现对原系统的全局渐近镇定。同时滑模控制理论表明, 渐近稳定的系统能在有限时间内到达滑模表面, 从而保证了整个系统的稳定可控性。

证毕。

反馈控制律(式(16))同样使得 USV 航向控制系统(式(1))全局渐近稳定。

### 2.3 基于 Backstepping 法的控制器设计

假设不确定性  $F=0$ , 下面基于 Backstepping 法进行控制器的设计。

**定理 2** 假设不确定性  $F=0$ , 选择  $c_1, c_2, c_3$  均为正常数, 在反馈控制律(式(28))的作用下, 系统(式(3))是全局渐近稳定的, 从而实现对系统(式(1))的全局渐近镇定控制。

**证明** 由式(12)可知, 如果  $z_3 = 0$ , 则  $V_2 \leq 0$ , 为此需要进一步设计。

定义 Lyapunov 函数为

$$V_5 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 \tag{26}$$

对  $V_5$  求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 = & \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 = \\ & -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 + z_3 [f_1 + b_1 u - \dot{\chi}_2] \end{aligned} \tag{27}$$

取反馈控制律  $u$  为

$$u_B = b_1^{-1} (\dot{\chi}_2 + \dot{\chi}_2 - f_1 - z_2 - c_3 z_3) \tag{28}$$

其中  $c_3$  为正常数。这样就得到了系统(式(3))的反馈控制律。证毕。

### 3 仿真结果和分析

依据海试操纵性实验结果, USV 航向操纵系统的参数为:  $K = -2.364, T = 5.489, \alpha = 0.000094, K_E = 1, T_E = 1.1$ 。以下反步自适应滑模控制器称为控制律 1, 基于 Backstepping 法的控制器称为控制律 2。控制律 1 的设计参数为:  $c_1 = 0.9, c_2 = 0.5, k_1 = 0.8, h = 0.35, \beta = \gamma = 0.001$ ; 控制律 2 的设计参数为:

$c_1 = 0.1, c_2 = 0.4, c_3 = 0.3$ 。

下面的仿真对比实验中初始值取为:  $\psi_0 = -30^\circ, r_0 = 0$ ; 同时考虑舵角机械饱和和限制条件为  $-30^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$ ; 设定与角加速度同量级的不确定性输入为: 建模误差  $\Delta = \sin(10\pi t)$  ( $^\circ \cdot s^2$ ), 干扰力  $\omega = \pm 1$  ( $^\circ \cdot s^2$ ) 的正态白噪声过程。设置期望航向为谐波航向  $\psi_d = \sin(t/40)$  和直航  $\psi_d = 0$  两种情形, 使用 MATLAB Simulink 软件进行数值仿真, 仿真实验结果如图 2 ~ 10 所示。



图1 实验中的USV

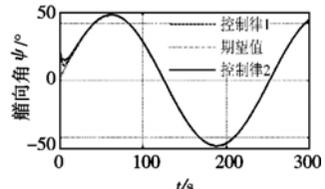


图2 航向角psi响应曲线

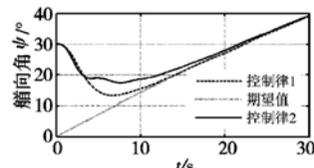


图3 航向角psi响应曲线(起始到30s)

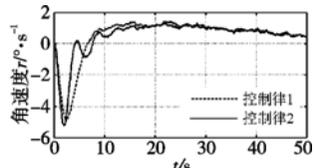


图4 角速度r响应曲线

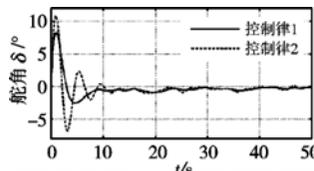


图5 实际舵角delta响应曲线

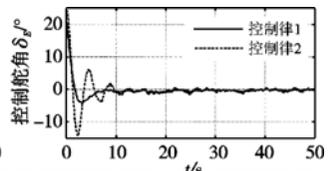


图6 控制舵角delta\_e响应曲线

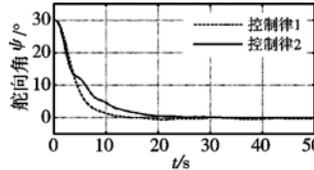


图7 航向角psi响应曲线

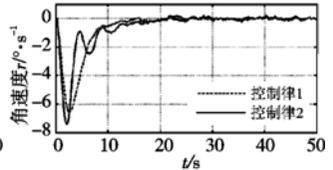


图8 角速度r响应曲线

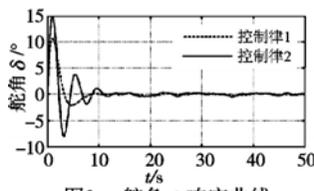


图9 舵角delta响应曲线

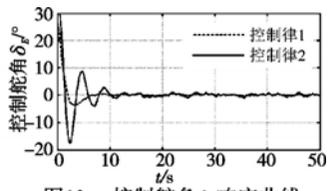


图10 控制舵角delta\_e响应曲线

谐波航向跟踪的实验结果如图 2 ~ 6 所示。从图 2、7 可以看出, 两种控制律皆能实现航向的跟踪, 这验证了定理 1 和 2。如图 3 ~ 6 所示, 与控制律 2 相比, 控制律 1 的收敛时间更短, 控制舵角输出更小; 同时, 在不确定性的影响下, 舵角输出平缓、振荡较小, 航向输出光滑, 即控制律 1 有较好的动态跟踪性能和自适应能力。直航控制的实验结果如图 7 ~ 10 所示, 相比控制律 2, 控制律 1 收敛快、航向输出光滑, 有较好的控制性能和自适应能力。

表 1 中列出了在两种控制律作用下, 航向跟踪控制结果的对比数据。其中,  $T_s$  为镇定时间;  $W_e = \int_0^\infty |\psi - \psi_d| dt$  为航向跟踪误差代价函数,  $W_e$  越小意味着航向跟踪性能越好;  $J_E = \int_0^\infty |\delta| d\tau$  为实际舵角代价函数, 即控制能量函数,  $J_E$  越小表明耗能越少, 更具经济性。显然, 控制律 1 比控制律 2 有更高的控制精度和跟踪性能, 较小的能量消耗, 且镇定时间更短, 这对于航向保持控制有重要意义。

(下转第 100 页)

式(7)进行特征融合(integration),对同样的语料进行训练和分类测试。在特征维数为 2 000 时,电脑语料的正面情感词  $\theta$  值为 0.5、负面情感词  $\theta$  值为 3、酒店语料情感词  $\theta$  值都为 12。实验结果如表 2 所示,融合后的分类效果有所提高。其不同特征维数的实验结果如图 1 所示。从图中可以看出,关于计算机评论的 chi 分类效果最高的  $F1$  值在 89%,融合后的分类效果最高值在 91%,融合后的特征还是有所提高;关于酒店评论的 chi 分类最高的  $F1$  值在 75%,融合的特征基本在 80% 以上,融合后的分类效果有明显的提高,说明了本文方法的正确性。

表 1 使用情感词典的分类实验结果( $F1/\%$ )

结果	情感词典	
	电脑	酒店
$F1$ 值	77.4	78.8

表 2 特征选择以及特征融合的分类实验结果( $F1/\%$ )

方法	电脑	酒店
chi	89.3	71.3
integration	90.3	82.2

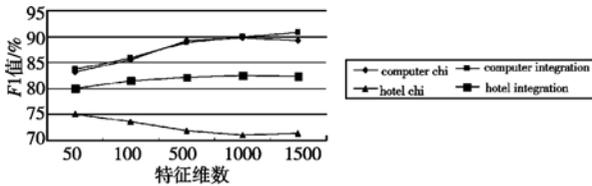


图 1 使用特征选择与特征融合在不同语料库上的实验结果

#### 4 结束语

实验结果表明,单纯地使用某一类方法得到的特征进行的分类效果都小于融合特征后的效果。由于缺乏对情感词典词

性倾向性的研究和完备的语料库,如何从已有的语料库中选择更好的特征来构建较好的概率模型以及搜集更多的情感语料,是下一步的工作。

#### 参考文献:

- [1] 赵妍妍,泰兵,刘挺. 文本情感分析[J]. 软件学报,2010,21(8): 1834-1848.
- [2] HU Ming-qing, LIU Bing. Mining and summarizing customer reviews [C]//Proc of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2004:168-177.
- [3] 王素格,杨安娜,李德玉. 基于汉语情感词表的句子情感倾向分类研究[J]. 计算机工程与应用, 2009,45(24):153-155.
- [4] PANG Bo, LEE L, VAITHYANATHAN S. Thumbs up? sentiment classification using machine learning techniques [C]//Proc of Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2002: 79-86.
- [5] 王素格,魏英杰. 停用词表对中文文本情感分类的影响[J]. 情报学报,2008,27(2):175-179.
- [6] 知网[EB/OL]. [2011-04-22]. <http://www.keenage.com>.
- [7] YANG Yi-ming, PEDERSEN J O. A comparative study on feature selection in text categorization [C]//Proc of the 14th International Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publisher, 1997: 412-420.
- [8] 唐惠丰,谭松波,程学旗. 基于监督学习的中文情感分类技术的比较研究[J]. 中文信息学报, 2007,21(6):88-94.
- [9] 谭松波. 中文情感挖掘语料 ChenSentiCorp [EB/OL] (2010-06-29) [2011-04-22]. <http://www.searchforumrg.cn/tan-songbo/corpus-senti.htm>.

(上接第 84 页) 表 1 控制效果对比

控制律	谐波跟踪			直航镇定		
	$T_s/s$	$W_e/^\circ$	$J_E$	$T_s/s$	$W_e/^\circ$	$J_E$
1	14	155	141	15	132	32
2	23	172	157	21	161	49

#### 4 结束语

本文中讨论了存在模型不确定性和未知外界干扰力,并考虑舵机伺服系统因素时,USV 航向非线性系统的跟踪控制问题。该控制方法的优点在于设计中考虑了舵机特性以及未知建模误差和环境干扰力的影响,且具有自适应能力。仿真对比实验验证了本文所提控制律具有良好的自适应能力和跟踪性能。

#### 参考文献:

- [1] SKJETNEA R, FOSSEN T I, KOKOTOVIC P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory [J]. Automatica, 2005, 41(2): 289-298.
- [2] HU S S, YANG P H, JUANG J Y, et al. Robust nonlinear ship course keeping control by  $H_\infty$  L/O linearization and  $\mu$ -synthesis [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2002, 13(1): 55-70.
- [3] 刘雨,郭晨,吕进. 基于 backstepping 的船舶航向滑模控制[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2007, 38(Z1): 278-279.
- [4] 朱齐丹,周芳,赵国良,等. 基于反步法和滑模观测器的船舶航向控制[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(4): 121-122.
- [5] 杜佳璐,郭晨,杨承恩. 船舶航向非线性系统的自适应跟踪控制器设计[J]. 应用科学学报, 2006,24(1): 83-87.

- [6] 张显库. 船舶航向保持的非线性逆推鲁棒控制算法[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(2): 80-83.
- [7] 罗伟林,邹早建,李铁山. 船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 893-894.
- [8] 袁雷,吴汉松. 船舶航向非线性系统的多滑模自适应模糊控制[J]. 智能系统学报, 2010, 5(4): 308-312.
- [9] YU Zhen-yu, BAO Xin-ping, NONAMI K. Course keeping control of an autonomous boat using low cost sensors [J]. Journal of System Design and Dynamics, 2008, 2(1): 389-400.
- [10] YU Zhen-yu, BAO Xin-ping, NONAMI K. Mixed  $H_2/H_\infty$  based course following control for a small low cost autonomous boat [J]. ICGST International Journal on Automatic Control and Systems Engineering, 2007, 7(1): 51-59.
- [11] BAO Xin-ping, NONAMI K, YU Zhen-yu. Combined yaw and roll control of an autonomous boat [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009: 188-193.
- [12] LIAO Yu-lei, PANG Yong-jie, WAN Lei. Combined speed and yaw control of underactuated unmanned surface vehicles [C]//Proc of the 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2010: 157-161.
- [13] 范尚雅. 船舶操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 30-39.
- [14] SUSSMANN H J. A general theorem on local controllability [J]. SIAM Journal of Control and Optimization, 1987, 25(11): 158-194.
- [15] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 240-247.