

小型吊舱式无人艇航向控制

郑艳芳¹, 俞万能^{1,2,3}, 廖卫强^{1,2}, 蒋仁炎¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 船舶辅助导航技术国家地方联合工程研究中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对小型吊舱式无人艇航向控制系统精度问题, 考虑模型中的不确定性和风、浪干扰等未知项, 设计一种基于 RBF 神经网络和迭代滑模算法的自适应控制器。在建立吊舱式无人艇运动数学模型基础上, 采用迭代滑模算法提高收敛时间, 并通过 RBF 神经网络权值逼近模型参数不确定项和未知扰动, 最终将该算法与迭代滑模算法进行仿真比较。结果表明, 所提出的自适应控制算法可减弱迭代滑模抖振现象, 提高收敛速度和航向控制精度, 满足无人艇对航向偏差控制的要求。

[关键词] 小型吊舱无人艇; 航向控制; RBF 神经网络; 迭代滑模算法

[中图分类号] U 664.82

The Course Control of Small Pod-Type Unmanned Surface Vehicle Using RBF Neural Network Adaptive Sliding Mode Control

ZHENG Yanfang¹, YU Wanneng^{1,2,3}, LIAO Weiqiang^{1,2}, JIANG Renyan¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China;

3. National and Local Joint Engineering Research Center for Ship Aided Navigation Technology, Xiamen 361021, China)

Abstract: Aiming at the accuracy problem on the course control of small pod-type USV, while considering the uncertainties of the model by the unknown terms such as wind and wave interferences, an adaptive controller based RBF neural network and iterative sliding mode algorithm is developed. On the basis of establishing the mathematical model for the motion of the pod-type USV, an iterative sliding mode algorithm was used to shorten the convergence time, and the RBF neural network weights were employed to approximate the uncertain items of model parameters and unknown disturbances. Finally, comparison of course control stability was carried out between iterative sliding mode algorithm and this algorithm. The results show that the proposed adaptive control algorithm can weak the iterative sliding mode chattering phenomenon, improve the convergence speed and the course control accuracy, and meet the requirements of the USV for course deviation control.

Keywords: small pod-type unmanned surface vehicle (USV); ship course control; radial basis function neural network; iterative sliding mode algorithm

[收稿日期] 2021-07-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (51679106; 52171308)

[作者简介] 郑艳芳 (1997—), 女, 硕士生, 从事船舶航迹控制、船舶电力推进及其控制方面的研究。通信作者: 俞万能 (1970—), 男, 博士, 教授, 博导, 从事船舶电力推进及船舶新能源应用等方面的研究。E-mail:19916000004@jmu.edu.cn

1.1 吊舱式无人艇运动数学模型

根据吊舱推进特性可知, 吊舱推进具有良好的机动性和推进效率高等优点, 而且吊舱式推进系统垂直贯穿于无人艇尾部主轴, 可大幅度减小船舶内部空间^[9]。根据燕聃聃等^[10]对吊舱推进的研究, 针对该吊舱式无人艇进行平面运动受力分析与建模。

由现有经验可知, 船舶的垂荡、横摇和纵摇运动对船舶运动控制研究影响较小, 因此本文只考虑前进、横漂和艏摇三自由度运动^[11]。无人艇平面运动图如图 2 所示。通过运动分析可知, 无人艇在运动过程中主要受到推力及侧向力的作用, 在偏航时通过改变转向角 δ 使得无人艇保持期望航向^[12]。结合 Piao 等^[13]对船舶运动模型的研究, 可得吊舱无人艇模型运动方程为

$$\begin{cases} \dot{u} = (X_H + X_{Pod} + X_{wave} + X_{wind} + (m + m_y)vr)/(m + m_x), \\ \dot{v} = (Y_H + Y_{Pod} + Y_{wave} + Y_{wind} - (m + m_x)ur)/(m + m_y), \\ \dot{r} = (N_H + N_{Pod} + N_{wave} + N_{wind})/(I_{zz} + J_{zz}), \\ \dot{\psi} = r, \\ \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi, \\ \dot{y} = v \cos \psi + u \sin \psi. \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 、 Y 、 N 分别为无人艇纵向力、横向力以及艏摇力矩; H 表示船体; Pod 表示吊舱推进器; m 为无人艇质量; m_x 、 m_y 为 x 轴、 y 轴方向的附加质量; u 、 v 、 r 为无人艇运动中的前进速度、横漂速度和转首角速度; I_{zz} 为 x 轴的惯性矩; J_{zz} 为 z 轴方向上的附加惯性矩; ψ 为无人艇航向角。

1.2 吊舱式推进器矢量模型

根据赵雅聪^[14]对吊舱推进器的研究, 并结合无人艇特性, 对公式 (1) 中的吊舱推进器进行矢量建模:

$$\begin{cases} X_{Pod} = (1 - t_{Pod})T_p \cos(\delta) + (1 - t_R)Q \sin(\delta), \\ Y_{Pod} = (1 - t_{Pod})T_p \sin(\delta) + (1 + \alpha_{HPod})Q \cos(\delta), \\ N_{Pod} = (x_{Pod} + \alpha_{HPod}x_{HPod})Q \cos(\delta) - x_{Pod}(1 - t_{Pod})T_p \sin(\delta). \end{cases} \quad (2)$$

式中: X_{Pod} 、 Y_{Pod} 、 N_{Pod} 分别为吊舱推进纵向推力、侧向推力及回转力矩; t_{pod} 为螺旋桨推力减额系数; t_R 为转向阻力减额系数; T_p 为吊舱推进器推力; Q 为吊舱侧向力; δ 为吊舱转向角; α_{HPod} 为吊舱诱导的侧向力系数; x_{HPod} 为吊舱-船体侧向力系数作用点的纵向坐标; x_{Pod} 为吊舱压力中心的纵向坐标。

其中: T_p 和 Q 的表达式为

$$\begin{aligned} T_p &= \rho_a n^2 D_p^4 K_T; \\ Q &= -0.5 \rho_a f_a d A_p U_p^2 \sin(a_p). \end{aligned}$$

式中: ρ_a 为海水密度; n 为螺旋桨转速; D_p 为螺旋桨直径; K_T 为螺旋桨推力系数; a_p 为吊舱有效攻角, 取值范围为 $(-0.5236 \text{ rad}, 0.5236 \text{ rad})$, 则在取值范围内 $\sin(a_p) \approx a_p \approx \delta$; f_a 为冲角, $a_p = 0$ 时的斜率; A_p 为吊舱有效面积; U_p 为吊舱有效来流速度。

联立吊舱式无人艇航向控制系统运动数学模型公式 (1), 在 MATLAB/Simulink 仿真环境中建立小型吊舱无人艇航向控制仿真模型, 如图 3 所示。

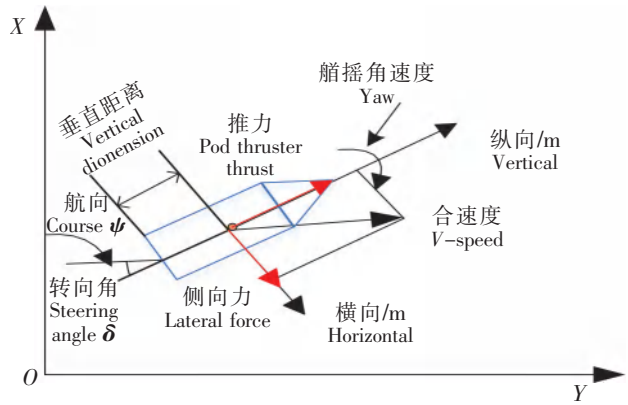


图 2 无人艇的平面运动示意图

Fig.2 Schematic diagram of the plane movement of the USV

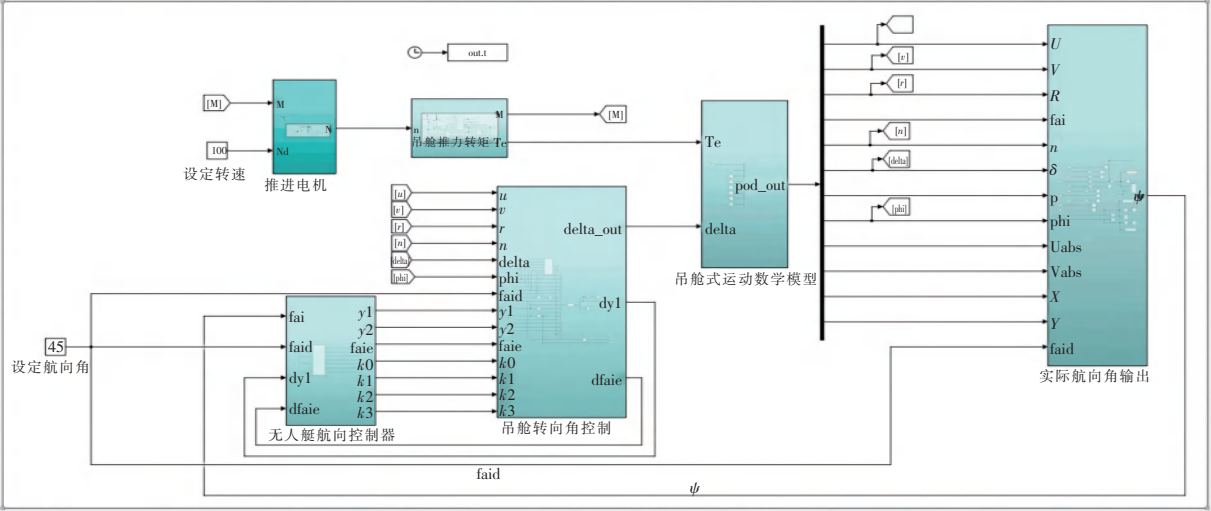


图 3 小型吊舱无人艇航向控制仿真模型

Fig.3 Simulation model of course control for pod-type USV

2 基于 RBF 神经网络自适应迭代滑模的吊舱式无人艇航向控制器

吊舱式无人艇控制系统具有非线性和复杂性的特点，在风、浪干扰下，无人艇摆动明显，若无法及时校正航向偏差，将出现航行偏离甚至控制失效等现象^[15]。采用 RBF 神经网络自适应迭代滑模算法设计一种航向控制器，校正扰动和模型不确定性问题，提高收敛速度，满足无人艇航行精度要求。

2.1 迭代滑模航向控制设计

迭代滑模算法可克服系统的不确定，提高响应速度，所以采取迭代滑模算法使实际航向能够跟踪无人艇设定航向 x_d ^[16]。定义航向偏差 $e = x_1 - x_d$ ，则偏差导数为 $\dot{e} = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = x_2 - \dot{x}_d$ ，无人艇航向器设计目标是减小偏差，使得 e 、 \dot{e} 必须逐渐趋近于零，即保证系统沿“滑模切换面”运动。

迭代滑模算法运动性能只取决于滑动面控制参数^[17]，设“滑模切换面”为 $s_n = \dot{e} + ce$ ， $n = 1, 2, \dots, c > 0$ 。其中： c 为“滑模切换面”控制参数。令 $\dot{s}_n = -\lambda \text{sgn}(s_n)$ ， $n = 1, 2, \dots$ ， $\lambda > 0$ 为可调参数。设吊舱转向角 $\delta = u_L$ ，则吊舱转向角控制律为 $u_L = -[f(x, T) + D_{wr} + c\dot{e} + \lambda \text{sgn}(s) - \ddot{x}_d]/b$ ， $c > 0$ 。式中： $f(x, T)$ 为流体动力项； T 为时间常数； $D_{wr} = (N_{wave} + N_{wind})/(I_{zz} + J_{zz})$ 为风浪扰动项； $b = -[(x_{Pod} + a_{HPod}x_{HPod})(0.5\rho A_p f_a U_p^2) + x_{Pod}(1 - t_p)T_p]/(I_{zz} + J_{zz})$ 。

根据无人艇吊舱转向角约束条件，引入饱和函数对其进行设计^[18-19]，令饱和函数为非线性正切函数 $\tanh[(e_0^x - e_0^{-x})/(e_0^x + e_0^{-x})]$ 。由此可知：当 $x \rightarrow 0$ 时，其函数斜率比较大，随着 x 值逐渐增加，斜率 e_0 逐渐减小并趋近于零，所以其饱和函数满足操纵运动中降低吊舱航向角偏差的要求，并保持稳定。

进一步构建航向偏差“滑模切换面”为

$$\begin{cases} s_1(e) = k_2 \tanh(k_1 e) + \dot{e}, \\ s_2(s_1) = k_4 \tanh(k_3 s_1) + \dot{s}_1, \end{cases} \quad k_1, k_2, k_3, k_4 \in \mathbf{R}^+.$$

(3)

式中： k_1, k_2, k_3, k_4 为可调参数；当 $s_2 \rightarrow 0$ 时， $s_1 \rightarrow 0$ 。为了满足系统有效到达“滑模切换面”，对 s_2 进

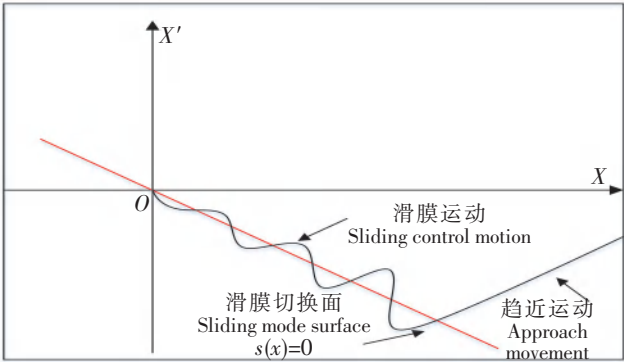


图 4 滑模状态点运动过程示意图

Fig.4 Schematic diagram of sliding mode state point movement process

行镇定控制, 保证 s_2 收敛速度快于 s_1 , 保证参数 $k_4 \geq k_2$ 。

展开公式 (3) 得

$$s_2 = k_4 \tanh(k_3 k_2 \tanh(k_1 e) + k_3 \dot{e}) + k_2 k_1 \dot{e} \cosh^2(k_1 e) + f(x, T) + bu_L + D_{wr} - \ddot{x}_d \quad (4)$$

构建 Lyapunov 函数

$$V = s_2^2/2 \quad (5)$$

$$\dot{V} = s_2 \dot{s}_2 = s_2 \dot{\delta} \partial s_2 / \partial \delta \quad (6)$$

为此设一负定 \dot{V} , 使 $\dot{V} \leq 0$, 令其方程为:

$$\dot{V} = -\eta s_2^2 \quad (7)$$

式中, $\eta > 0$, 满足 $\dot{V} \leq 0$, 将公式 (6) 和公式 (7) 联立, 可得系统稳定条件为:

$$\dot{s}_2 + \eta s_2 = 0 \quad (8)$$

当 s_2 满足公式 (8) 时, 系统渐近稳定, 则得到满足稳定条件的吊舱转向角控制律为:

$$u_L = -\{k_4 \tanh(k_3 s_1) + \dot{s}_2/\eta + k_2 k_1 \dot{e} / \cosh^2(k_1 e) + f(x, T) + D_{wr} - \ddot{x}_d\} / b \quad (9)$$

化简公式 (9) 得:

$$u_L = u_{eq} - \{k_4 \tanh(k_3 s_1) + \dot{s}_2/\eta + k_2 k_1 \dot{e} / \cosh^2(k_1 e) + \ddot{x}_d\} \quad (10)$$

式中: $u_{eq} = -(f(x, T) + D_{wr})/b$ 。包含系统未知非线性函数 $f(x, T)$ 和扰动 D_{wr} , 则为使 u_{eq} 的值稳定, 其“滑模切换面” $s_2 \rightarrow 0$, 而吊舱转向角控制律 u_L 为光滑有界函数, 在短时间内变化很小, 故引入 $u_L(t - \Delta)$ 对 u_{eq} 进行估计, Δ 为估计值, 随着 t 增大, 满足 $\Delta \rightarrow 0$, 则:

$$u_{eq} = u_L(t - \Delta) + \{k_4 \tanh(k_3 s_1) + \dot{s}_2/\eta + k_2 k_1 \dot{e} / \cosh^2(k_1 e) - \ddot{x}_d\} / b \quad (11)$$

化简后得:

$$u_{eq} = u_L(t - \Delta) - \{s_2 - k_4 \tanh(k_3 s_1) - k_2 k_1 \dot{e} / \cosh^2(k_1 e) + \ddot{x}_d\} / b \quad (11)$$

将公式 (11) 代入公式 (10) 得:

$$u_L = u_L(t - \Delta) - (s_2 + \dot{s}_2/\eta) / b$$

2.2 改进的自适应滑模航向控制设计

由于公式 (4) 中存在 $f(x, T)$ 的不确定性项和风、浪扰动未知扰动 D_{wr} 。综合 Han 等^[20] 研究, 采用 RBF 神经网络优化等效迭代滑模转向角控制律, 进一步逼近非线性正切函数 $\tanh[(e_0^x - e_0^{-x}) / (e_0^x + e_0^{-x})]$, 减弱扰动 D_{wr} 误差影响, 提高动态响应特性。

RBF 神经网络的高斯基函数输出为:

$$h_i = \exp[-\|x - c_i\|^2 / (2b_i^2)]; f(\cdot) = w^{*T} h(x) + \varepsilon$$

式中: i 为网络隐含层第 i 个网络输入, $i = 1, 2, \dots, m$ $m \in \mathbf{N}^+$; c_i 为高斯基函数中心位置; b_i 为基宽参数; ε 为网络逼近误差; w^* 为理想网络权值, 由于 w^* 在实际中无法得到, 故采取 \hat{w} 为理想网络权值估计值, 设 \bar{W} 为估计误差, 则理想网络权值估计值为: $\hat{w} = w^* - \bar{W}$ 。

设神经网络输入为 $x = [u \quad v \quad r \quad \psi]^T$, 则神经网络估计值输出为: $\hat{f} = (\hat{w} + \bar{W})^T h(x) + \varepsilon$ 。

将神经网络估计值代入公式 (9) 中得:

$$u_L = -\{k_4 \tanh(k_3 s_1) + \dot{s}_2/\eta + k_2 k_1 \dot{e} / \cosh^2(k_1 e) - \ddot{x}_d + (\hat{w} + \bar{W})^T h(x) + \varepsilon + D_{wr}\} / b \quad (12)$$

由式 (12) 可知存在理想有界值 C , 使得 $(\bar{W})^T h(x) + |D_{wr}| + |\varepsilon| \leq C$ 。令 C 估计值为 \hat{C} , 则 $(\bar{W})^T h(x) + |D_{wr}| + |\varepsilon| \approx \rho \hat{C}$, ρ 为误差值; 估计误差为 $\bar{C} = C - \hat{C}$ 。吊舱转向角控制律为

$$u_L = -\{k_4 \tanh(k_3 s_1) + \dot{s}_2/\eta + k_2 k_1 \dot{e} / \cosh^2(k_1 e) - \ddot{x}_d + (\hat{w})^T h(x) + \rho \hat{C}\} / b \quad (13)$$

将公式 (13) 代入公式 (4) 中得: $s_2 = f(x, T) - \dot{s}_2/\eta + D_{wr} - (\hat{w})^T h(x) - \rho \hat{C}$ 。

由于外界扰动要远大于神经网络估计误差和逼近误差, 则令 $|D_{wr}| \approx \rho C$, ρ 为消除抖振值

$\tanh(s_2/\gamma)$, $\gamma > 0$ 。进一步化简得

$$s_2 = -\dot{s}_2/\eta + (\bar{W})^T h(x) + \varepsilon + \rho \bar{C}。$$

(14)

RBF 神经网络的理想网络权值向量自适应律及理想有界估计值为

$$\dot{\hat{w}} = \dot{s}_2 h(x)/\tau, \tau > 0。$$

(15)

$$\dot{\hat{C}} = \rho \dot{s}_2/\zeta, \zeta > 0。$$

(16)

根据 Lyapunov 稳定性定理构建函数为: $V = s_2^2/2 + \tau(\bar{W})^T(\bar{W})/2 + \zeta(\bar{C})^2/2$ 。那么

$$\dot{V} = s_2 \dot{s}_2 - \tau(\bar{W})^T(\dot{\hat{w}}) - \zeta(\bar{C})(\dot{\hat{C}})。$$

(17)

将公式 (14)、公式 (15) 和公式 (16) 代入公式 (17) 中化简得

$$\dot{V} = \dot{s}_2((\bar{W})^T h(x) + \varepsilon + \rho \bar{C}) - \dot{s}_2(\bar{W})^T h(x) - \dot{s}_2(C)\rho - s_2^2/\eta = -s_2^2/\eta。$$

由于 $\eta > 0$, $\varepsilon \rightarrow 0$, 则 $\dot{V} \leq 0$, 满足 Lyapunov 稳定性条件, 故无人艇航向控制误差为渐进收敛, 并趋于稳定。

3 仿真实验与分析

3.1 吊舱操纵模型回转运动仿真

无人舱的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 吊舱无人艇的主要设计参数

Tab.1 The main design parameters of the pod-type unmanned surface vehicle

船长 Length /m	船宽 Breadth/m	船舶质量 Dead weight /kg	吃水 Draft/m	型深 Moulded depth/m	航速 Speed /(km · h ⁻¹)	重心距中心距离 Distance between center of gravity and center /m	最大航速率 Limit maximum steering angle rate/[(°) · s ⁻¹]	
1.82	0.58	90	0.18	0.30	6.0	0.12	3.0	
盘面比 Blade area ratio	螺旋桨直径 Propeller diameter/m	桨叶数 Propeller blade number	桨轴中心距底高 Propeller center height/m	排水体积 Displacement /m ³	续航能力 Endurance capability/h	最大航速 Maximum speed /(km · h ⁻¹)	限制最大转向角 Limit maximum steering angle/(°)	
7.13	0.27	3.0	0.38	2.57	5.0	9.0	35.0	

根据表 1 中无人艇参数计算吊舱推力及力矩, 并对所构建模型进行回转操纵运动仿真研究。仿真结果如图 5、图 6 所示。

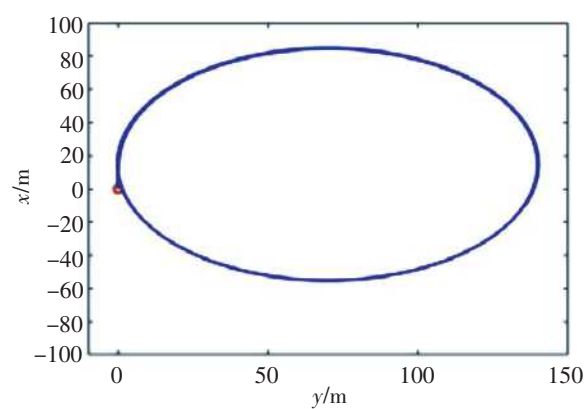


图 5 吊舱转向角为 30°的回转运动

Fig.5 Rotation trajectory diagram of the pod with a steering angle of 30°

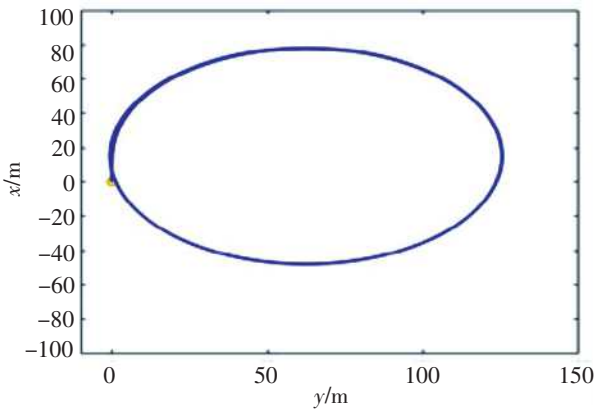


图 6 吊舱转向角为 45°的回转运动

Fig.6 Rotation trajectory diagram of the pod with a steering angle of 45°

仿真结果表明, 在 30° 和 45° 回转情况下, 吊舱式无人艇的运动方向可保持稳定, 保证了吊舱转向角的灵敏性和准确性。

3.2 吊舱式无人艇航向自适应滑模控制仿真

验证 RBF 神经网络迭代滑模航向控制, 对小型吊舱式无人艇航向控制进行仿真研究, 并将仿真结果与等效迭代滑模和 PID 控制的仿真结果进行对比。仿真参数设置: 无人艇固定航速为 1.67 m/s ; 螺旋桨转速为 100 r/min ; 起始航向角为 0° ; 期望航向角为 45° 。选取 PID 控制器 $\delta = k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e}$, 其控制参数为 $k_p = 7.000$, $k_L = 0.002$, $k_D = 0.005$; 迭代滑模算法控制参数 k_1, k_2, k_3, k_4 分别为 $0.04, 6.00, 0.03, 6.00$; RBF 神经网络控制参数 $\gamma = 0.003$, $\tau = 1000.0$, $\zeta = 100.0$, $\eta = 0.2$, 并令隐含层数量 $i = 40$, 基宽参数 $b_i = 1.5$, 中心位置 c_j 均匀分布, 分别取值为 $c_{i1} \in (-20.0, 20.0)$, $c_{i2} \in (-1.0, 1.0)$, $c_{i3} \in (-0.5, 0.5)$, $c_{i4} \in (-0.2, 0.2)$ 。

1) 无风浪扰动下的仿真结果。限制吊舱转向角范围为 $|\delta| \leq 35^\circ$, 变换速率为 $|\dot{\delta}| \leq 3^\circ/\text{s}$ 时无人艇仿真实验如图 7、图 8 所示。

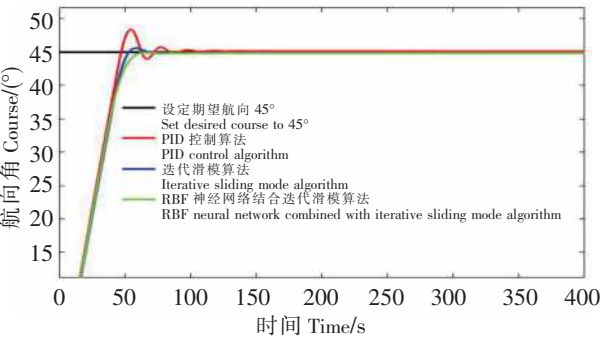


图 7 无人艇航向变化曲线图

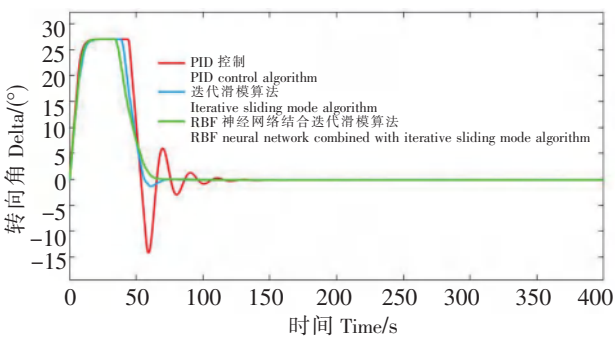


图 8 吊舱转向角变化曲线图

Fig.7 Course change curve of unmanned surface vehicle Fig.8 The change curve of the steering angle of the pod

在无干扰情况下, 采用 RBF 神经网络迭代滑模算法比等效迭代滑模控制、PID 控制收敛速度更快, 航向控制趋于稳定状态。而且 RBF 神经网络迭代滑模算法无超调, RBF 神经网络迭代滑模算法比 PID 控制稳定时间快约 20.1986 s , 比等效迭代滑模稳定时间快约为 7.5068 s 。而且采用 RBF 神经网络迭代滑模转向角的峰值最小, 过渡过程趋于平缓, 对吊舱推进器的使用寿命有益。

2) 风、浪扰动下的仿真结果。设定风速为 20 m/s ; 风向角为 20° ; 有义波高为 5 m ; 遭遇角为 20° ; 吊舱转向角限制为 35° ; 吊舱转向角速率限制为 $3^\circ/\text{s}$ 。在相同的干扰情况下, 无人艇的仿真结果如图 9、图 10。

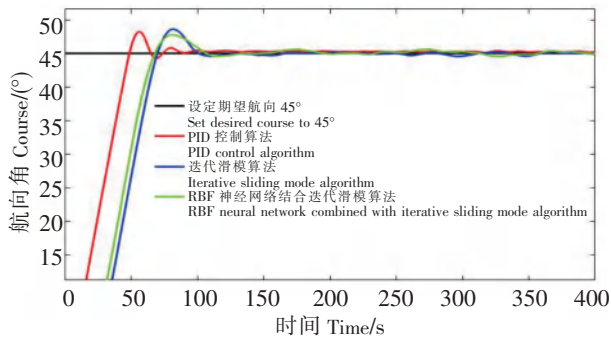


图 9 风、浪干扰下无人艇航向变化曲线图

Fig.9 Course change curve of unmanned surface vehicle under wind and wave interference

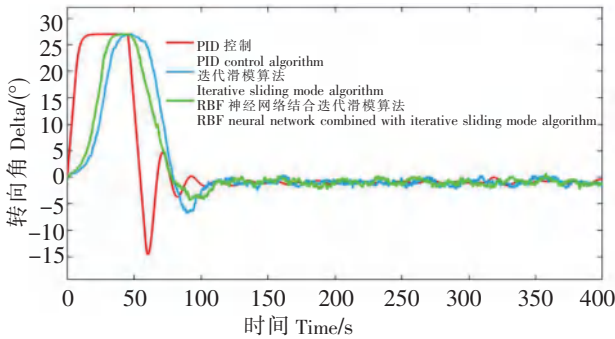


图 10 风、浪干扰下吊舱转向角变化曲线图

Fig.10 Change curve of pod steering angle under wind and wave interference

由图 9、图 10 可知,采用 PID 控制的超调量为 12.608%,等效迭代滑模算法超调量为 10.396%,而 RBF 神经网络自适应迭代滑模算法超调量为 5.795%,且趋于稳定时间更短。在干扰情况下,RBF 神经网络自适应迭代滑模能够保证航向变化历程与无干扰时基本一致,具有较强的鲁棒性。

4 结语

本文采用 RBF 神经网络和迭代滑模算法补偿系统模型参数不确定及扰动影响,提高吊舱式无人艇航向控制稳定性。仿真数据表明,RBF 神经网络对吊舱式无人艇迭代滑模转向角控制律进一步优化,有效改进迭代滑模抖振现象,降低超调量,提高收敛速度,减小扰动影响,满足无人艇航行的稳定性。下一步将本文提到的吊舱式无人艇 RBF 神经网络迭代滑模航向控制应用到实船中,进一步验证算法的有效性。

[参 考 文 献]

- [1] LECCE N D, LASCHI C, BIBULI M, et al. Neural dynamics and sliding mode integration for the guidance of unmanned surface vehicles [C] //MTS/ IEEE Oceans'15 Conference. Genova: OES, 2015: 1-6.
- [2] 燕聃聃. 基于吊舱推进的小型水面无人艇航迹控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [3] PIAO Z, GUO C, SUN S. Adaptive backstepping sliding mode dynamic positioning system for pod driven unmanned surface vessel based on cerebellar model articulation controller [J]. IEEE Access, 2020, 39(99): 1-1.
- [4] YU J F, YAN Z B, WANG J, et al. Robust stabilization of ship course via convex optimization [J]. Asian Journal of Control, 2014, 16(3): 25-32.
- [5] ZHANG X K, ZHANG Q, REN H X, et al. Linear reduction of backstepping algorithm based on nonlinear decoration for ship course-keeping control system [J]. Ocean Engineering, 2018, 147(1): 1-8.
- [6] 武颖, 杨胜强, 李文辉, 等. 基于滑模反演的欠驱动水面无人艇航向控制 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 47-53.
- [7] PIAO Z, GUO C, SUN S. Adaptive backstepping sliding mode dynamic positioning system for pod driven unmanned surface vessel based on cerebellar model articulation controller [J]. IEEE Access, 2020, 11(99): 1-1.
- [8] 靳海英. 滑模控制在吊舱式航向控制器中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(10): 97-99.
- [9] 慕东东, 王国峰, 范云生, 等. 吊舱推进无人水面艇的航向保持 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 274-281.
- [10] 燕聃聃, 文元桥, 肖长诗, 等. 吊舱推进的小型水面无人船航迹控制系统设计 [J]. 船海工程, 2017, 46(4): 210-214.
- [11] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型——机理建模与辨识建模 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [12] 朴在吉. POD 推进船舶操纵数学模型与智能控制 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [13] PIAO Z, GUO C. CMAC - ADRC integrated course control for POD ship [C] //International Conference on Information systems. Wuhan: CAAI, 2017, 22-25.
- [14] 赵雅聪. 基于滑模控制的吊舱式船舶航向控制器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] 杨江. 吊舱式电力推进系统的建模与仿真 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [16] WAN L, CHEN Y, ZHOU Y. Adaptive sliding mode controller for course keeping of unmanned surface vehicle [C] //Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Xinzhou: CAA, 2019, 1-6.
- [17] ANH P, N VU, LAI P T, et al. Sliding mode based lateral control of unmanned aerial vehicles [J]. Procedia Computer Science, 2019, 150(1): 78-87.
- [18] 吴俊鹏, 王猛. 船舶航向变结构控制器的设计与仿真 [J]. 自动化与仪表, 2014, 29(12): 30-33.
- [19] 关克平, 张新放. 滑模控制船舶动力定位控制系统研究 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40(5): 61-65.
- [20] HAN Y, XIAO H, PAN W, et al. Research on RBFNN sliding mode control and its application in ship course control [C] //Second International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Wuhan: CCF, 2010, 1-4.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)