

## 欠驱动船舶路径跟踪的神经网络稳定自适应控制

刘 杨<sup>1</sup>, 郭 晨<sup>1</sup>, 沈智鹏<sup>1</sup>, 刘 雨<sup>1</sup>, 郭 迪<sup>2</sup>

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026; 2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 针对三自由度欠驱动船舶模型参数不确定的路径跟踪问题, 设计了神经网络稳定自适应控制器. 首先应用微分同胚等效变换和Lyapunov直接法设计参考航向和参考速度, 然后对船舶模型参数不确定的操纵环路和推进环路分别设计神经网络稳定自适应控制器跟踪参考航向和参考速度, 并对外界风浪流干扰进行自适应补偿. Lyapunov稳定性分析证明了船舶路径跟踪闭环系统的所有误差信号一致最终有界. 仿真研究验证了神经网络稳定自适应路径跟踪器的有效性.

**关键词:** 欠驱动船舶; 路径跟踪; Lyapunov直接法; 神经网络; 稳定自适应自动舵

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Stable adaptive neural network control of path following for underactuated ships

LIU Yang<sup>1</sup>, GUO Chen<sup>1</sup>, SHEN Zhi-peng<sup>1</sup>, LIU yu<sup>1</sup>, GUO Di<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;  
2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** We propose a stable adaptive-neural-network control for the path following in a 3 degrees-of-freedom (3DOF) underactuated ship with parameters uncertainties and disturbances. Based on the diffeomorphism transformation and Lyapunov direct method, controllers for the reference yaw angle and the reference speed are designed. Signal errors in the closed-loop path following system are proved to be uniformly ultimately bounded in a small neighborhood of zero. Numerical simulation results are given to illustrate the effectiveness of the stable adaptive-neural-network algorithm.

**Key words:** underactuated ships; path tracking; Lyapunov direct method; neural network; stable adaptive autopilot

### 1 引言(Introduction)

近年来, 欠驱动系统的控制问题一直是倍受关注的研究热点. 目前海上航行的大多数船舶仅装备螺旋桨主推进器和舵装置用以推进和操纵船舶, 系统的独立控制输入量少于其自由度, 是典型的欠驱动系统. 传统的船舶航迹控制并不直接控制船舶的位置, 仅靠操舵来控制船舶的航向从而间接控制船舶的航迹, 但是在特定的作业情况如布雷、铺设管线及管线维护等, 船舶需要精确按照预定的航线航行, 这给传统的航迹控制带来一定的挑战. 欠驱动船舶航迹控制的难点在于船舶模型具有欠驱动特性, 不能采用静态反馈线性化的方法来处理.

在船舶控制中, 在某些系统参数不确定情况下进行精确的路径跟踪控制, 是非常重要的. 文献[1,2]提出了基于Lyapunov, backstepping和参数投影算法

的鲁棒自适应控制器, 对有不稳定参数和外界风浪流的干扰有很好的鲁棒性. 但算法过于复杂, 且要求系统质量和水动力导数与速度的精确关系. 文献[3]利用导航系统将路径跟踪分离为两个独立的任务进行控制地方法, 但是并没有考虑船舶模型参数不确定的情况. 文献[4,5]只考虑了直线跟踪问题. 本文借鉴文献[3]的导航系统概念, 把欠船舶运动系统分为运动环路和动力环路分别进行设计. 在运动环路, 根据微分同胚等效变换把地坐标系的位置误差转换为路径坐标系下的位置误差, 利用Lyapunov直接法设计参考航向和参考速度. 在动力环路控制中, 对船舶参数不确定的操纵环路和推进环路分别设计神经网络稳定自适应控制器跟踪参考航向和参考速度, 并对地坐标系下的风浪流干扰设计自适应干扰补偿. 整个设计过程都

用Lyapunov稳定性分析保证跟踪误差信号的稳定性,并用仿真研究验证欠驱动船舶路径跟踪神经网络稳定自适应控制器的有效性.

## 2 船舶数学模型和问题描述(Ship model and problem descriptions)

考虑三自由度欠驱动水面船舶的运动学和动力学模型分别为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi, \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi, \\ \dot{\psi} = r, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{u} = f_u(u, v, r) + \frac{\tau_u + b_u}{m_{11}}, \\ \dot{v} = f_v(u, v, r) + \frac{b_v}{m_{22}}, \\ \dot{r} = f_r(u, v, r) + \frac{\tau_r + b_r}{m_{33}}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned} f_u &= \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{d_u}{m_{11}}u - \sum_{i=2}^3 \frac{d_{ui}}{m_{11}}|u|^{i-1}u, \\ f_v &= -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{d_v}{m_{22}}v - \sum_{i=2}^3 \frac{d_{vi}}{m_{22}}|v|^{i-1}v, \\ f_r &= \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}}uv - \frac{d_r}{m_{33}}r - \sum_{i=2}^3 \frac{d_{ri}}{m_{33}}|r|^{i-1}r, \end{aligned}$$

$(x, y)$ 是船的位置坐标,  $\psi$ 为航向;  $u, v$ 和 $r$ 是船体坐标系下前进、横向和首摇角速度;  $m_{jj}, 1 \leq j \leq 3$ ; 表示船舶固有和附加质量, 为已知项;  $d_u, d_v, d_r, d_{ui}, d_{vi}, d_{ri} (i = 2, 3)$ 表示在前进、横向和偏航角方向上的水动力阻尼为不确定项, 这里忽略了高阶阻尼;  $[b_u, b_v, b_r]^T = R(\psi)^T [b_x, b_y, b_\psi]^T$ , 其中 $b = [b_x, b_y, b_\psi]^T$ 表示为地坐标系下作用在船体上的低频环境干扰, 即 $\dot{b} = 0$ , 为不确定项.

## 3 船舶数学模型和问题描述(Ship model and problem descriptions)

### 3.1 船舶运动环路设计(Design for ship kinematics loop)

借鉴文献[3]的导航系统的思路, 把船舶运动系统分为运动环路和动力环路分别进行设计. 只考虑船舶运动方程(1), 设计参考航向和速度. 假设参考轨迹 $P_d(\theta) = [x_d(\theta), y_d(\theta)]^T$ , 其中 $\theta$ 为参考轨迹参数,  $\varepsilon = R_p^T(\chi_t)(P - P_d(\theta))$ 为位置误差( $P - P_d(\theta)$ )的微分同胚等效变换<sup>[7]</sup>, 即 $\|\varepsilon\| \rightarrow 0 \Leftrightarrow \|p - p_d(\theta)\| \rightarrow 0$ , 因此可把 $\varepsilon = 0$ 作为平衡点, 则参考航向为

$$\chi_d(\theta, e) = \chi_t(\theta) + \chi_r(e). \quad (3)$$

轨迹参数自适应率为

$$\dot{\theta} = (U \cos(\chi - \chi_t) + k_s s) / \sqrt{\dot{x}_d + \dot{y}_d}. \quad (4)$$

船舶参考和速度为

$$U_d = k_U \sqrt{e^2 + \Delta^2}. \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \chi_t &= \arctan\left(\frac{\dot{y}_d(\theta)}{\dot{x}_d(\theta)}\right), \quad \chi_r = \arcsin\left(-\frac{e}{\sqrt{\Delta^2 + e^2}}\right), \\ \varepsilon &= [s, e]^T, \quad k_s > 0, \quad \chi = \arctan\left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right), \\ k_e &> 0, \quad k_U > 0, \quad U = \sqrt{u^2 + v^2}. \end{aligned}$$

**引理 1** 如果参考航向用公式(3)定义,  $\theta$ 以公式(4)更新, 参考和速度 $U_d$ 满足公式(5), 则 $\varepsilon$ 是一致全局最终有界的.

**证** 相应的证明在稳定性分析中给出, 也可参考文献[3].

**注 1**  $\mathbb{R}^n$ 表示 $n$ 维欧几里得空间.  $\mathbb{R}^{n \times m}$ 表示一组 $n \times m$ 欧几里得矩阵. 定义“ $\cdot$ ”表示一个标量, 一个向量或者一个矩阵, 那么 $\|\cdot\|$ 表示“ $\cdot$ ”的欧几里得范数;  $|\cdot|$ 表示“ $\cdot$ ”的绝对值;  $\hat{\cdot}$ 表示“ $\cdot$ ”的估计值;  $\tilde{\cdot} = \hat{\cdot} - \cdot$ 表示“ $\cdot$ ”相应的误差;  $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示“ $\cdot$ ”的最小奇异值.

### 3.2 船舶动力环路控制器设计(Design for ship dynamics loop)

动力环路分为操纵和推进两个环路, 以下分别进行设计. 考虑不确定船舶动力学模型(2)因为模型存在不确定项, 不能直接用输入/输出线性化控制方法, 从而引入用神经网络估计不确定项, 并对干扰进行自适应补偿. 首先设计操纵环路控制器.

令 $\psi_d = \chi_d - \beta$ , 并定义

$$e_r = \psi - \psi_d. \quad (6)$$

$$s_r = k_{er} e_r + \dot{e}_r. \quad (7)$$

其中:  $k_{er} > 0$ ,  $\beta = \arctan\left(\frac{v}{u}\right)$ ;  $\beta$ 定义为偏航角, 是真航向 $\psi$ (船头与 $x$ 轴夹角)与航迹向 $\chi$ (船舶运行航迹的切线与 $x$ 轴轴夹角)的夹角, 顺时针为正.

**注 2** 如果 $t \rightarrow \infty$ 时有 $s_r \rightarrow 0$ , 则有 $t \rightarrow \infty$ 时 $e_r \rightarrow 0$ <sup>[7]</sup>.

因此 $s_r = 0$ 可视为系统(2)第3个等式闭环系统的平衡点, 则

$$\dot{s}_r = k_{er} \dot{e}_r + f_r + \frac{\tau_r + b_r}{m_{33}} - \ddot{\psi}_d. \quad (8)$$

由于 $d_u, d_v, d_r, d_{ui}, d_{vi}$ 和 $d_{ri}, i = 2, 3$ 为不确定项, 因此 $f_r$ 不确定, 用RBF神经网络估计不确定函数 $f_r$ , 有

$$f_r = w_r^T \varphi_r(\eta, \dot{\eta}) + \varepsilon_r. \quad (9)$$

其中:  $\eta = [x, y, \psi]^T$ ,  $\|\varepsilon_r\| \leq \varepsilon_{Nr}$ ; 神经网络权值

为  $w_r = [w_{r1}, w_{r2}, \dots, w_{rh}]^T$ , 基函数为  $\varphi_r(\eta, \dot{\eta}) = [\varphi_{r1}, \varphi_{r2}, \dots, \varphi_{rh}]^T$ ,  $\varphi_{rj} = e^{-\|[\eta, \dot{\eta}]^T - c_j\|^2 / \sigma_j^2}$  为高斯函数, 有  $h$  个隐层结点.

假设用于逼近  $f_r$  的神经网络权值有界:  $\|w_r\| \leq w_R$ . 令

$$\hat{f}_r = \hat{w}_r^T \varphi_r(\eta, \dot{\eta}). \quad (10)$$

选择控制输入为

$$\tau_r = (-\hat{f}_r + \ddot{\psi}_d - k_{er}\dot{e}_r - k_r \text{sat}(s_r, e))m_{33} - \hat{b}_r. \quad (11)$$

其中:  $\text{sat}(s_r, e) = \frac{s_r}{|s_r| + \delta_0 + \delta_1|e|}$ ,  $k_r > 0$ ,  $\delta_0 > 0$ ,  $\delta_1 > 0$ .  $\text{sat}(\cdot, e)$  是  $\kappa$  类函数, 又随着轨迹跟踪误差  $e$  的增大而减小, 因此可以有效地减小因执行机构饱和引起的抖振.

估计函数的自适应率为

$$\dot{\hat{w}}_r = \Gamma_r[\varphi_r(\eta, \dot{\eta})s_r - \sigma_{rw}(\hat{w}_r - \hat{w}_{r0})], \quad (12)$$

$$\dot{\hat{b}}_r = \gamma_r[s_r - \sigma_{rb}(\hat{b}_r - b_{r0})]. \quad (13)$$

其中:  $\Gamma_r \in \mathbb{R}^{h \times h}$  且正定,  $\gamma_r > 0$ ,  $\sigma_{rw} > 0$ ,  $\sigma_{rb} > 0$ . 接下来设计推进环路控制器.

定义

$$e_u = u - u_d. \quad (14)$$

其中:  $u_d = U_d \cos \beta$  为船体坐标系中的期望前向速度为, 令

$$\dot{e}_u = f_u + \frac{\tau_u + b_u}{m_{11}} - \dot{u}_d. \quad (15)$$

同样用RBF神经网络进行逼近

$$f_u = w_u^T \varphi_u(\eta, \dot{\eta}) + \varepsilon_u. \quad (16)$$

其中:  $\|\varepsilon_u\| \leq \varepsilon_{Nu}$ , 神经网络权值为  $w_u = [w_{u1}, w_{u2}, \dots, w_{uh}]^T$ , 基函数为  $\varphi_u(\eta, \dot{\eta}) = [\varphi_{u1}, \varphi_{u2}, \dots, \varphi_{uh}]^T$ ,  $\varphi_{uj} = e^{-\|[\eta, \dot{\eta}]^T - c_j\|^2 / \sigma_j^2}$  为高斯函数, 有  $h$  个隐层结点.

假设用于逼近  $f_u$  的神经网络权值有界:  $\|w_u\| \leq w_U$ , 则

$$\hat{f}_u = \hat{w}_u^T \varphi_u(\eta, \dot{\eta}). \quad (17)$$

选择控制输入为

$$\tau_u = (-\hat{f}_u + \dot{u}_d - k_u e_u)m_{11} - R_1^T \hat{b}_{x,y}. \quad (18)$$

其中:  $R_1 = [\cos \psi \quad \sin \psi]^T$ ,  $k_u > 0$ ,  $\hat{b}_{x,y} = [\hat{b}_x, \hat{b}_y]^T$ .

估计函数的自适应率为

$$\dot{\hat{w}}_u = \Gamma_u[\varphi_u(\eta, \dot{\eta})e_u - \sigma_{uf}(\hat{w}_u - \hat{w}_{u0})], \quad (19)$$

$$\dot{\hat{b}}_{x,y} = \gamma_u[e_u R_1 - \sigma_{ub}(\hat{b}_{x,y} - \hat{b}_{x0,y0})]. \quad (20)$$

其中:  $\Gamma_u \in \mathbb{R}^{h \times h}$  且正定,  $\gamma_u \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  且正定.

**引理 2** 针对系统(2), 神经网络稳定自适应控制率(11)(18)和估计函数自适应率(12)(13)(29)(20), 可使闭环系统的所有信号以及状态一致最终有界.

**证** 在稳定性分析中给出.

### 3.3 稳定性分析(Stability analysis)

选取Lyapunov函数

$$V_d = \frac{1}{2}(s_r^2 + e_u^2 + \tilde{w}_r^T \Gamma_r^{-1} \tilde{w}_r + \frac{1}{m_{33}} \gamma_r^{-1} \tilde{b}_\psi^2 + \tilde{w}_u^T \Gamma_u^{-1} \tilde{w}_u + \frac{1}{m_{11}} \tilde{b}_{x,y}^T \gamma_u^{-1} \tilde{b}_{x,y}). \quad (21)$$

**注 3** 如系统(2)的干扰由风, 流和2阶浪引起, 在以往的研究中大多假设干扰在体坐标系下是常量, 本文是在地坐标系下建立低频干扰, 这更符合实际. 相对于船舶动态这些干扰的频率是很低的, 所以可以假设  $\dot{b} = 0$ , 为了避免高频一阶浪干扰对推进系统的磨损, 在此高频干扰进入控制环之前必须经过滤波器去除.

**注 4**  $R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ , 因为  $[b_u, b_v, b_r]^T = R(\psi)^T [b_x, b_y, b_\psi]^T$ , 所以有  $b_r = b_\psi$ .

对  $V_d$  求时间导数, 并把为式(11)~(15)(19)~(23)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_d = & \frac{-k_r s_r^2}{|s_r| + \delta_0 + \delta_1|e|} - k_u e_u^2 - \tilde{f}_r s_r - \frac{1}{m_{33}} \tilde{b}_r s_r - \\ & \frac{1}{m_{11}} R_1^T \tilde{b}_{x,y} e_u - \tilde{f}_u e_u + \tilde{w}_r^T \Gamma_r^{-1} \dot{\tilde{w}}_r + \\ & \frac{1}{m_{33}} \gamma_r^{-1} \tilde{b}_r \dot{\tilde{b}}_r + \tilde{w}_u^T \Gamma_u^{-1} \dot{\tilde{w}}_u + \\ & \frac{1}{m_{11}} \tilde{b}_{x,y}^T \gamma_u^{-1} \dot{\tilde{b}}_{x,y} + s_r \varepsilon_r + e_u \varepsilon_u = \\ & \frac{-k_r s_r^2}{|s_r| + \delta_0 + \delta_1|e|} - k_u e_u^2 - \tilde{w}_r^T \sigma_{rw}(\hat{w}_r - w_{r0}) - \\ & \frac{1}{m_{33}} \tilde{b}_r \sigma_{rb}(\hat{b}_r - b_{r0}) - \tilde{w}_u^T \sigma_{uw}(\hat{w}_u - w_{u0}) - \\ & \frac{1}{m_{11}} \tilde{b}_{x,y}^T \sigma_{ub}(\hat{b}_{x,y} - b_{x0,y0}) + s_r \varepsilon_r + e_u \varepsilon_u \leq \\ & \frac{0.5}{m_{33}} \sigma_{rb}(\|\tilde{b}\|^2 + \|b_r - b_{r0}\|^2) - \frac{1}{m_{33}} \sigma_{rb} \|\tilde{b}\|^2 + \\ & 0.5 \sigma_{rw}(\|\tilde{w}_r\|^2 + \|w_r - w_{r0}\|^2) + \\ & \frac{0.5}{m_{11}} \sigma_{ub}(\|\tilde{b}_{x,y}\|^2 + \|b_{x,y} - b_{x0,y0}\|^2) + \\ & 0.5 \sigma_{uw}(\|\tilde{w}_u\|^2 + \|w_u - w_{u0}\|^2) - \\ & \sigma_{rw} \|\tilde{w}_r\|^2 - \sigma_{uw} \|\tilde{w}_u\|^2 - \frac{1}{m_{11}} \sigma_{ub} \|\tilde{b}_{x,y}\|^2 - \end{aligned}$$

$$\frac{-k_r s_r^2}{|s_r| + \delta_0 + \delta_1 |e|} - k_u e_u^2 + s_r \varepsilon_r + e_u \varepsilon_u \leq -\lambda V + \rho. \quad (22)$$

其中 $\lambda$ 和 $\rho$ 满足

$$\lambda := \min\{2k_r/(|s_r| + \delta_0 + \delta_1 |e|), 2k_u, \sigma_{rw}/\lambda_{\min}(\Gamma_r^{-1}), \sigma_{rb}\gamma_r, \sigma_{uw}/\lambda_{\min}(\Gamma_u^{-1}), \sigma_{ub}/\lambda_{\min}(\gamma_u^{-1})\}, \quad (23)$$

$$\rho := 0.5\sigma_{rw}\|w_r - w_{r0}\|^2 + \frac{0.5}{m_{33}}\sigma_{rb}\|b_r - b_{r0}\|^2 + 0.5\sigma_{uw}\|w_u - w_{u0}\|^2 + s_r \varepsilon_r + \frac{0.5}{m_{11}}\sigma_{ub}\|b_{x,y} - b_{x0,y0}\|^2 + e_u \varepsilon_u. \quad (24)$$

令 $\mu = \rho/\lambda$ , 那么式(24)可以写成

$$0 \leq V_d(t) \leq \mu + (V_d(0) - \mu)e^{-\lambda t}. \quad (25)$$

由此所有式(21)里的信号都满足一致最终有界. 从式(23)~(25)可知 $\mu$ 是 $V(t)$ 的终值, 如果选择参数 $k_r, k_u, \gamma_r, \lambda_{\min}(\Gamma_u), \lambda_{\min}(\Gamma_r)$ 和 $\lambda_{\min}(\gamma_u)$ 足够大, 则可使 $V(t)$ 任意小. 由此, 证明了引理2的正确性.

**注5** 由式(21)可知 $w_r, w_u, b_r$ 和 $b_u$ 也可以最终收敛在一个小范围内, 但是很难准确地估计不确定项的上限, 如果 $w_r, w_u$ 满足PE(持续激励)条件, 那么 $\sigma_{rw} = \sigma_{rb} = \sigma_{uw} = \sigma_{ub} = 0$ , 就能保证 $w_r, w_u$ 的收敛, 然而在实际应用中PE条件是很难满足的, 所以要求 $(\sigma_{rw}, \sigma_{rb}, \sigma_{uw}, \sigma_{ub}) > 0$ , 以防止 $w_r, w_u$ 的发散. 一般情况下对于给定的被控对象, 模型的参数并不是完全未知的, 模型的辨识和建模经常在控制之前, 那么这些参数就可以作为相应的初始参数.

对于整个闭环系统, 平衡点为 $\varepsilon = 0, s_r = 0, e_u = 0, \tilde{b} = 0$ 和 $\tilde{w}_i = 0, i = u, r$ . 引理2的证明过程已经表明 $s_r, e_u, \tilde{b}$ 和 $\tilde{w}_i, i = u, r$ 是一致最终有界的. 下面考虑平衡点 $\varepsilon = 0$ 的稳定性, 定义Lyapunov函数

$$V_y = \frac{1}{2}\varepsilon^2. \quad (26)$$

对式(26)求时间导数得

$$\dot{V}_y = -k_s s^2 + eU \sin(e_r + \chi_r) = -k_s s^2 + \frac{(Ue^2 \cos e_r - Ue\Delta \sin e_r)}{\sqrt{e^2 + \Delta^2}}. \quad (27)$$

由引理2可知存在时间 $t_1 > 0$ , 对于 $\forall t > t_1$ 有 $|e_r| < |e_{r,ss}|$ , 其中 $\dot{V}_y(e_{r,ss}) < 0$ . 定义 $(0, t_0)$ 期间 $\dot{V}_y(e_{r,ss}) > 0$ , 其中 $t_1 > t_0 > 0$ . 因为 $(U, \cos e_r, \sin e_r) \in L_\infty$ , 由此对于任意的初始状态 $\varepsilon_0$ , 当 $t \rightarrow \infty$ 时有 $\varepsilon \rightarrow 0$ . 因此状态 $\varepsilon$ 为全局一致最终有界.

由于 $w_u, w_r, b_{x,y}$ 是常值, 因此系统(1)(2)各状态和 $\hat{w}_u, \hat{w}_r, \hat{b}_{x,y}$ 都是一致最终有界的.

**定理1** 针对系统(1)(2), 运动环路控制(3)(5)和动力环路控制(11)(18), 以及估计函数自适应率(4)(12)(13)(19)和(21)可使闭环系统的所有信号以及状态一致最终有界.

#### 4 应用实例与仿真(Application example and simulation)

为了验证算法的有效性, 应用文献[6]的船舶运动数学模型进行仿真研究. 船长38 m, 质量 $118 \times 10^3$  kg.

其他参数为

$$\begin{aligned} m_{11} &= 120 \times 10^3, m_{22} = 177.9 \times 10^3, \\ m_{33} &= 636 \times 10^5, d_u = 215 \times 10^2, \\ d_v &= 147 \times 10^3, d_r = 802 \times 10^4, \\ d_{u2} &= 0.2d_u, d_{u3} = 0.1d_u, d_{v2} = 0.2d_v, \\ d_{v3} &= 0.1d_v, d_{r2} = 0.2d_r, d_{r3} = 0.1d_r. \end{aligned}$$

参考轨迹为

$$x_d = 60 \sin(\theta/100), y_d = \theta.$$

船舶运动初值为

$$\begin{aligned} [x(0), y(0), \psi(0), u(0), v(0), r(0)] &= \\ [0, 100, 1.5, 3, 0, 0]. \end{aligned}$$

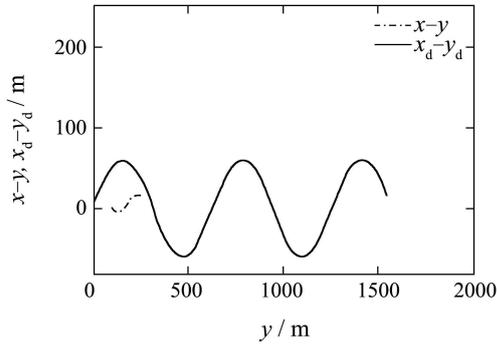
图1表示船舶运行过程中各变量的时间变化曲线. 图(a)为船舶运行轨迹曲线 $x - y$ 和参考路径曲线 $x_d - y_d$ , 可以看出船舶很快跟上并且能够稳定地跟踪在参考路径上. 图(b)为船舶航向, 因为干扰和操纵控制使得船舶横向的速度 $v$ 不为零, 因此 $\psi$ 与 $\chi$ 并不相等, 还可以看出由于操纵环路的神经网络稳定自适应控制使 $\chi$ 很快地跟踪参考航向 $\psi_d$ . 也是由于横向速度, 图(c)的船舶运行合速度 $U$ 与体坐标系下前进速度 $u$ 并不相等, 图中同样可以看出推进环路的神经网络稳定自适应控制使 $U$ 很快地跟踪参考速度 $U_d$ . 图(d)中可以看出此时 $v$ 为2.5 m/s~3.5 m/s.

图2为各不确定函数的真实值与其估计值, 图(a)(b)表明神经网络自适应能很好地估计动态参数变量. 图(c)为对风浪流干扰的自适应估计. 图(d)为路径误差的欧几里得范数, 即

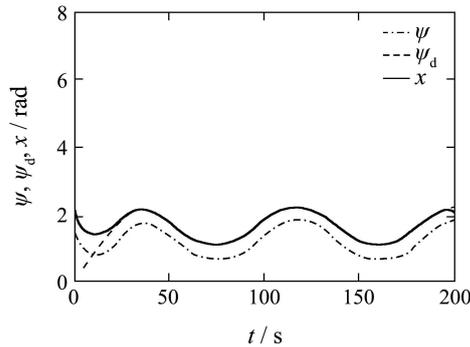
$$\text{norm}(\varepsilon) = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2}.$$

可以看出 $t = 0$ 时误差是100 m而约0.5 s后变为50 m, 这不是因为船舶的运动使得误差减小迅速, 而是由于运动环路的公式(4)可使参考轨迹参数变化很快, 即参考位置在参考路径上变化很快, 所以在很短的

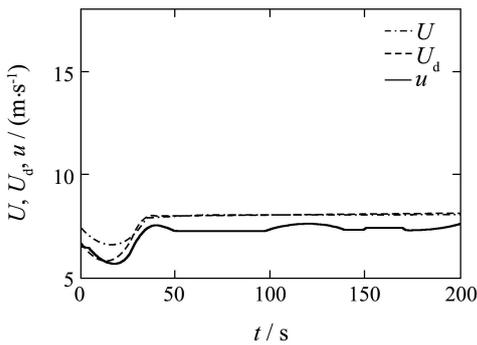
时间内误差可以变化很快, 这么做的优点是让船舶可以很快地跟踪最近的参考轨迹点.



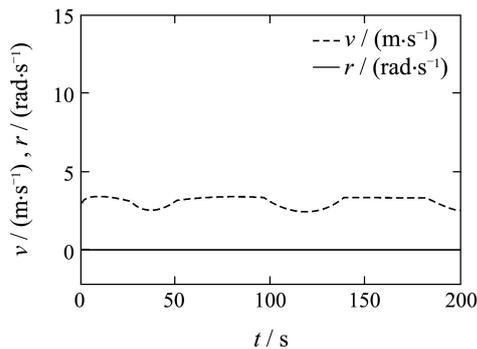
(a)



(b)



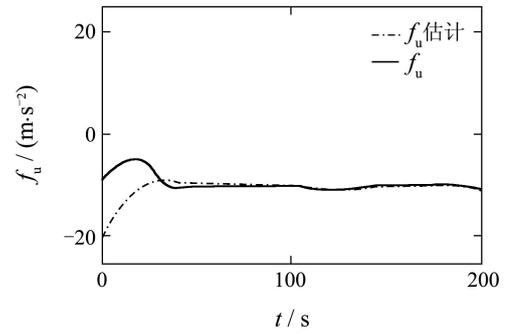
(c)



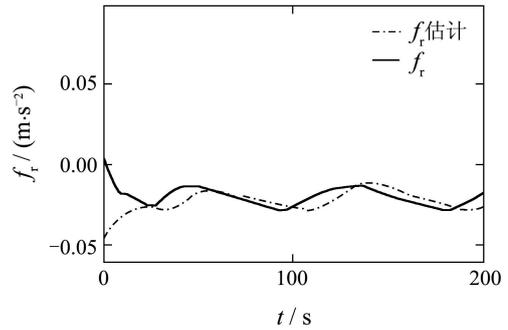
(d)

图 1 船舶路径跟踪各状态变量

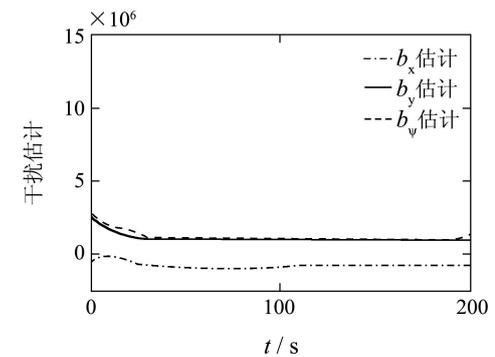
Fig. 1 The states of the path following system



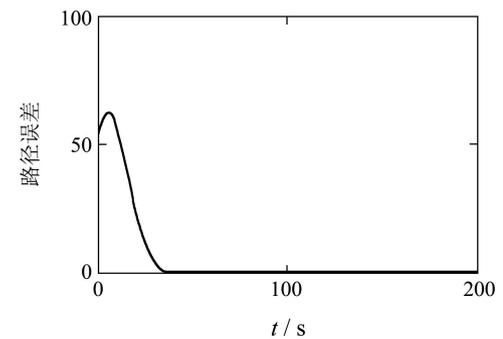
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2 自适应估计和路径跟踪误差

Fig. 2 The estimates of the adaptation and following error

图3为控制输入, 推进动力环路的控制输入曲线变化缓慢符合实际要求. 从操纵环路输入 $\tau_r$ 变化曲

线可以看出,开始的5 s,  $\tau_r$ 变化非常快,在实际中不易施舵实现,这是下一步需研究的问题。

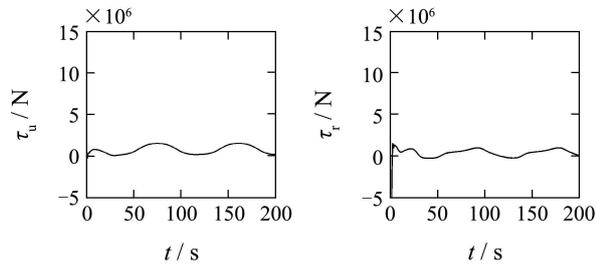


图3 控制输入

Fig. 3 The control inputs

## 5 结论(Conclusion)

本文针对欠驱动船舶模型参数不确定的路径跟踪问题,设计了神经网络稳定自适应控制器,并把控制系统分为运动环和动力环。在运动环,应用微分同胚变换和Lyapunov直接法设计了参考航向和参考速度。在动力环,对船舶参数不确定的操纵环和推进环分别设计神经网络稳定自适应控制器跟踪参考航向和速度,并对外界风浪流干扰进行了自适应补偿。定理1证明了路径跟踪闭环系统所有误差信号是一致最终有界的。仿真研究结果验证了神经网络稳定自适应控制器在欠驱动船舶路径跟踪控制中的有效性。

## 参考文献(References):

- [1] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2004, 40(2): 929 – 944.
- [2] DO K D, JIANG Z P, PAN J. Global robust adaptive path following of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1713 – 1722.
- [3] BREIVIK M, ROSSEN T I. Path following for marine surface vessels[C] // *Proceedings of the Oceans'04-MTTS/IEEE Techno-ocean'04(OTO'04)*. Kobe, Japan: IEEE, 2004, 4: 2282 – 2289.
- [4] 刘杨, 郭晨. 直线航迹控制的鲁棒自适应逆推设计[C] // 第七届全球智能控制与自动化大会. 重庆: IEEE Press, 2008: 8932 – 8935. (LIU Yang, GUO Chen. The robust adaptive design of straight-line tracking control[C] // *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation*. Chongqing: IEEE, 2008: 8932 – 8935.)
- [5] 李铁山, 杨盐生, 洪碧光, 等. 船舶航迹控制鲁棒自适应模糊设计[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(3): 445 – 448. (LI Tieshan, YANG Yansheng, HONG Biguang, et al. Robust adaptive fuzzy design for ships tracking-keeping control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 445 – 448.)
- [6] LI J H, LEE P M, JUN B H. Point-to-point navigation of underactuated ships[J]. *Automatica*, 2008, 44(12): 3201 – 3205.
- [7] KHALIL H K. 非线性系统(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

## 作者简介:

刘杨 (1981—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为船舶智能控制理论与应用, E-mail: muxiaoyi123@sina.com.cn;

郭晨 (1956—), 男, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制、船舶系统仿真、虚拟现实技术, E-mail: guoc@newmail.dlmu.edu.cn;

沈智鹏 (1977—), 男, 副教授, 目前研究方向为智能控制、船舶系统仿真, E-mail: s.z.p@263.net;

刘雨 (1974—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为船舶电力推进, E-mail: liuyu@dl.cn;

郭迪 (1988—), 女, 目前研究方向为导航制导与智能控制, E-mail: dididl@sina.com.