

船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制

罗伟林¹, 邹早建^{1,2}, 李铁山^{1,3}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030;
3. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 对船舶航向非线性系统, 提出了一种基于神经网络方法的鲁棒跟踪控制器. 系统由船舶运动非线性响应模型和舵机伺服系统串联构成, 其中运动响应模型考虑了建模误差和外界干扰力等非匹配不确定性. 对建模误差和期望舵角的一阶导数项应用在线二层神经网络予以辨识和补偿, 不确定性干扰项处理应用 L_2 增益设计. 采用Lyapunov函数递推法, 得到包括神经网络权值算法在内的跟踪控制器. 跟踪误差和神经网络权值误差的一致终值有界性保证了系统的鲁棒稳定性, 合理的控制器参数选择保证了控制精度. 仿真结果验证了控制器的有效性.

关键词: 船舶航向跟踪控制; 非匹配不确定性; 神经网络; L_2 增益设计; Lyapunov函数递归设计

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust tracking control of nonlinear ship steering

LUO Wei-lin¹, ZOU Zao-jian^{1,2}, LI Tie-shan^{1,3}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
3. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: A robust neural network based autopilot is proposed for ship steering control of surface ships with unmatched uncertainties. The cascaded system consists of the nonlinear ship response model and the rudder actuator dynamics. The response model takes account of the modeling errors and external disturbances. The modeling errors and the derivative of desired rudder are identified and subsequently compensated by two online two-layer neural networks, while the uncertain disturbances are suppressed by using L-two-gain design. By using the method of recursive Lyapunov functions, a robust tracking controller and tuning algorithms of weights are obtained. The uniformly ultimate boundedness of the tracking errors and weight errors guarantees the robust stability of the controller, while the appropriate selection of parameters in the controller guarantees the tracking precision. The results of simulation demonstrate the validity of the presented controller.

Key words: ship tracking control; unmatched uncertainties; neural networks; L-two-gain design; Lyapunov function recursive design

1 引言(Introduction)

船舶运动非线性系统存在一些无法用数学模型精确描述的不确定性, 包括建模误差如船舶载况变化引起的参数摄动和不确定的外部干扰如风、流等环境力作用. 此外, 舵机系统一般无法实现阶跃操舵. 如, 商船的舵机是由液压油缸推动的. 忽略这些非匹配不确定性和舵机特性将影响控制系统的性能品质. 简单的PID自动舵设计已不能满足要求. 目前船舶运动控制技术主要有: 参数自适应控制技术^[1]; 滑模变结构控制方法^[2]; 现代鲁棒控制策略^[3]; 基于人工智能的控制策略^[4]; 混合控制策略^[5,6]等.

2 船舶运动数学模型(Mathematical model of ship steering)

船舶运动响应型模型结构在船舶控制方面有着广泛的应用^[7,8]. 考虑不确定性, 非线性形式可写为

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha\psi^3 + \Delta(\psi, \dot{\psi}) + w = K\delta, \quad (1)$$

其中: ψ 为航向, δ 为舵角, T, K 为操纵性指数, $K < 0$ 时为航向不稳定, α 为非线性项系数; Δ 为建模误差, w 为外界干扰, 且增益有界.

舵机伺服系统响应方程一般表示为

$$T_E\dot{\delta} = \delta_c - \delta, \quad (2)$$

其中: T_E 为舵机时间常数, δ_c 为命令舵角.

3 鲁棒跟踪控制(Robust tracking control)

3.1 控制器设计(Controller design)

首先,根据逆运动学补偿,定义期望舵角为

$$\delta_d = (T\ddot{\psi}_d + f(\psi, \dot{\psi})\dot{\psi}_d + u_1)/K, \quad (3)$$

其中: $f(\psi, \dot{\psi}) = 1 + \alpha\dot{\psi}^2$, u_1 为辅助控制, ψ_d 为期望航向. 定义误差 $\xi = \delta_d - \delta$ 和变量 $\zeta = \dot{e} + \lambda e$, 其中, $e = \psi_d - \psi$, $\lambda > 0$. 把式(3)代入式(1)得

$$T\dot{\zeta} = (T\lambda - f)\dot{e} - u_1 + \Delta. \quad (4)$$

令: $\delta_c = \delta_d + u_2$, u_2 为辅助控制, 则式(2)可化为

$$T_E\dot{\xi} = T_E\dot{\delta}_d - \xi - u_2. \quad (5)$$

根据Lyapunov函数递归设计^[9,10], 取预选函数

$$V_1 = e^2/2 + T\zeta^2/2 + T_E\xi^2/2. \quad (6)$$

定义评价信号: $\mathbf{z} = [r_1e, r_2\dot{e}]^T$ ($r_{1,2} > 0$)和 L_2 性能指标: $\int_0^t \|\mathbf{z}\|^2 d\tau \leq \mu_1^2 \int_0^t \|w\|^2 d\tau + \mu_2$, $\mu_{1,2} > 0$. 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 + \|\mathbf{z}\|^2 - \mu_1^2 \|w\|^2 \leq & (r_1^2 + r_2^2\lambda^2 - \lambda)e^2 + \\ & \zeta(T\lambda\dot{e} - f\dot{e} + \Delta + e + \zeta/4\mu_1^2 + r_2^2\zeta - \\ & 2r_2^2\lambda e - u_1) + \xi(T_E\dot{\delta}_d + K\zeta - \xi - u_2), \end{aligned} \quad (7)$$

对 Δ 和 $\dot{\delta}_d$, 采用二层前馈神经网络逼近, 令:

$$\begin{aligned} T\lambda\dot{e} - f\dot{e} + \Delta + e + \zeta/4\mu_1^2 + \\ r_2^2\zeta - 2r_2^2\lambda e = \mathbf{W}_1^T\phi(\mathbf{h}) + \eta_1, \end{aligned} \quad (8)$$

$$T_E\dot{\delta}_d + K\zeta - \xi = \mathbf{W}_2^T\phi(\mathbf{h}) + \eta_2, \quad (9)$$

其中: $\mathbf{W}_{1,2}$ 为理想权值, 满足 $\|\mathbf{W}_i\|_F \leq W_{iM}$; $\phi(\cdot)$ 为隐层激活函数, \mathbf{h} 为网络预处理输入向量, $\eta_{1,2}$ 为网络重构误差, 满足 $|\eta_i| \leq \eta_{iN}$. 在激活函数取为基函数以及选择合适的隐层节点数的情况下, 网络能以任意精度逼近非线性函数^[11]. 辅助控制设计为:

$$\begin{cases} u_1 = \mathbf{W}_{1e}^T\phi(\mathbf{h}) + \lambda_1 T\zeta, \\ u_2 = \mathbf{W}_{2e}^T\phi(\mathbf{h}) + \lambda_2 T_E\xi, \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\lambda_{1,2} > 0$, \mathbf{W}_{ie} 为当前权值. 设计算法:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{W}}_{1e} = \varepsilon_1\phi(\mathbf{h})\zeta - \varepsilon_2\|\zeta\|\mathbf{W}_{1e}, \\ \dot{\mathbf{W}}_{2e} = \varepsilon_1\phi(\mathbf{h})\xi - \varepsilon_2\|\xi\|\mathbf{W}_{2e}, \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\varepsilon_{1,2} > 0$, $\varsigma = [\zeta, \xi]^T$ 为广义误差向量.

再令Lyapunov预选函数为

$$V_2 = V_1 + (\text{tr}\{\tilde{\mathbf{W}}_1^T\tilde{\mathbf{W}}_1\} + \text{tr}\{\tilde{\mathbf{W}}_2^T\tilde{\mathbf{W}}_2\})/2\varepsilon_1, \quad (12)$$

其中 $\tilde{\mathbf{W}}_i = \mathbf{W}_i - \mathbf{W}_{ie}$ 为权值误差, 可以证明:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 + \|\mathbf{z}\|^2 - \mu_1^2 \|w\|^2 \leq \\ -2\lambda_0 V_2 + \|\varsigma\|(\tau_1 - \tau_2\|\varsigma\| + \\ \varepsilon_2(W_{1M}^2 + W_{2M}^2)/4\lambda_3\varepsilon_1), \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\lambda_3 \in [0, 1]$, $\lambda_0 = \min\{-r_1^2 - r_2^2\lambda^2 + \lambda, (1 - \lambda_3)\lambda_1, (1 - \lambda_3)\lambda_2, (1 - \lambda_3)\varepsilon_2\|\zeta\|, (1 - \lambda_3)\varepsilon_2\|\xi\|\}$, $\tau_{1,2} > 0$. 结合推导过程, 系统跟踪控制器为

$$\delta_c = (T\ddot{\psi}_d + f\dot{\psi}_d + \mathbf{W}_{1e}^T\phi(\mathbf{h}) + \lambda_1 T\zeta)/K + \mathbf{W}_{2e}^T\phi(\mathbf{h}) + \lambda_2 T_E\xi. \quad (14)$$

3.2 稳定性分析(Stability analysis)

定义紧集 $U_\varsigma = \{\varsigma \mid \|\varsigma\| \leq b_\varsigma, b_\varsigma \in \mathbb{R}^+\}$, 如 ς 在紧集内, 式(13)化为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 + \|\mathbf{z}\|^2 - \mu_1^2 \|w\|^2 \leq & -2\lambda_0 V_2 + \varepsilon, \\ \varepsilon = & b_\varsigma(\tau_1 + \varepsilon_2(W_{1M}^2 + W_{2M}^2)/4\lambda_3\varepsilon_1). \end{aligned}$$

$w = 0$ 时, 满足 $\dot{V}_2 \leq -2\lambda_0 V_2 + \varepsilon$, 误差一致终值有界^[12]; $w \neq 0$ 时, 存在 $\varepsilon_0 > 0$, 使得 $\int_0^t \|\mathbf{z}\|^2 d\tau \leq \mu_1^2 \int_0^t \|w\|^2 d\tau + \varepsilon_0$, 满足鲁棒干扰抑制性能. 如 ς 落在 U_ς 之外, 选择参数使满足 $b_\varsigma \geq (\tau_1 + \varepsilon_2(W_{1M}^2 + W_{2M}^2)/4\lambda_3\varepsilon_1)/\tau_2$, 有: $\dot{V}_2 + \|\mathbf{z}\|^2 - \mu_1^2 \|w\|^2 \leq -2\lambda_0 V_2$. $w = 0$ 时, $\dot{V}_2 \leq -2\lambda_0 V_2$, 系统趋于渐近稳定; $w \neq 0$ 时, 类似前面情形可以证明闭环系统满足鲁棒干扰抑制性能. 欲提高控制精度, $\lambda_1, \lambda_2, \varepsilon_1$ 宜大, 而 ε_2 宜小.

4 数值仿真(Numerical simulation)

某自航船模参数为^[13]: $T = 10.31$ s, $\alpha = 81.75$ s/rad², $K = -0.95$ 1/s, $T_E = 0.72$ s. 控制器参数取: $\lambda = 0.1$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 2$, $\varepsilon_1 = 0.5$, $\varepsilon_2 = 0.05$, 最大舵角为40°; 不确定性设为: ① $\Delta = \sin \zeta$, 干扰项为 $\pm 2.86^\circ/\text{s}$ 之间的正态白噪声; ② $\Delta = \zeta$, 干扰为在 $t = 50$ s时幅值为1.5°/s的脉冲信号. 神经网络激活函数为单边Sigmoid函数, $\mathbf{h} = [e, \dot{e}, 1]^T$, 初始权值为零. 设期望航向为谐波航向和直航两种情形, 并在初时有偏差. 结果如图1~4所示. 其中 $r = \dot{\psi}$.

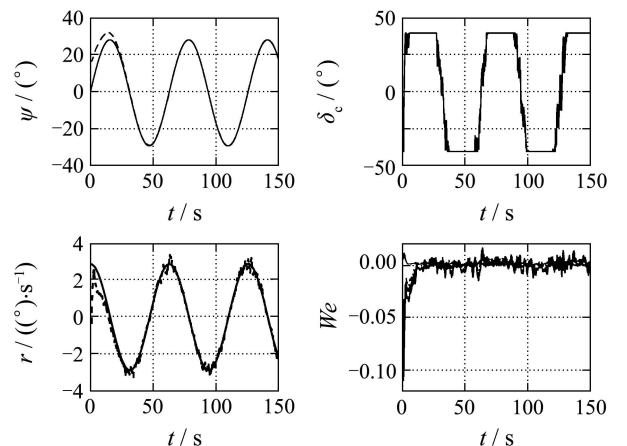


图1 谐波航向跟踪控制, 情形①建模误差和干扰
Fig. 1 Harmonic heading tracking control in case ①

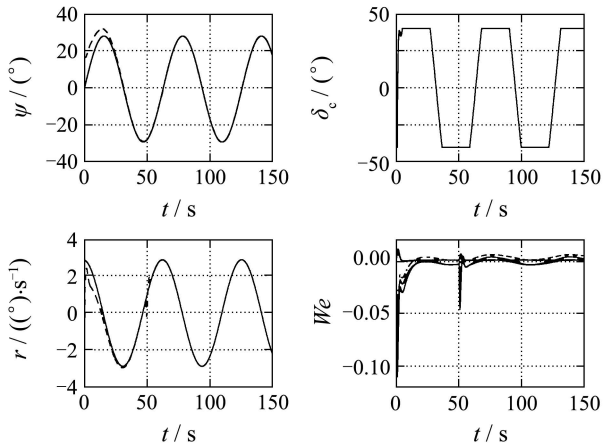


图 2 谐波航向跟踪控制, 情形②建模误差和干扰

Fig. 2 Harmonic heading tracking control in case ②

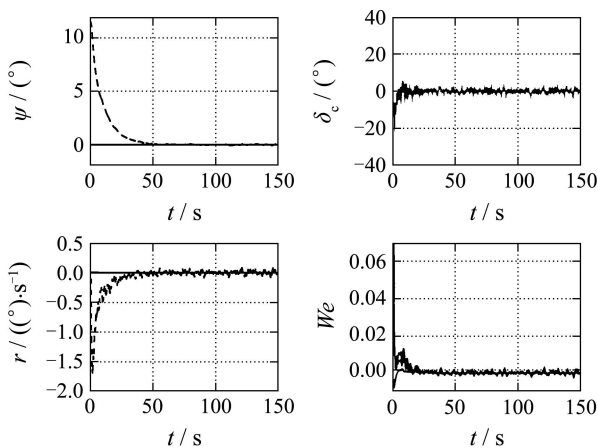


图 3 直航跟踪控制, 情形①建模误差和干扰

Fig. 3 Straight heading tracking control in case ①

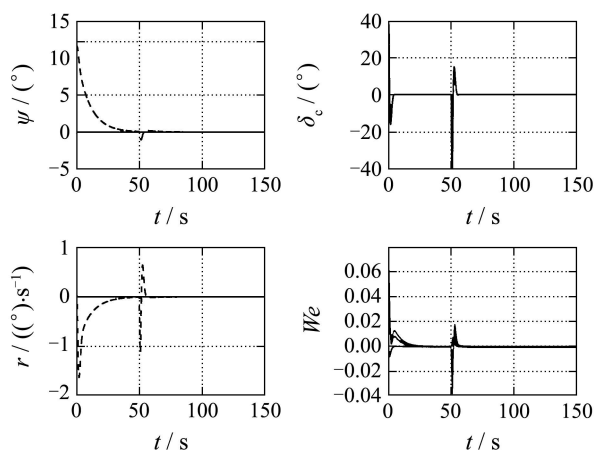


图 4 直航跟踪控制, 情形②建模误差和干扰

Fig. 4 Straight heading tracking control in case ②

图中实线代表期望值, 虚线代表实际值. 仿真结果表明, 设计的控制系统具有良好的鲁棒稳定性和控制精度, 操舵的物理实现也是合理的.

5 结论(Conclusions)

本文研究了由船舶刚体运动和舵机伺服系统构

成的级联系统的航向跟踪控制问题. 采用Lyapunov函数递归设计方法, 借助神经网络和 L_2 控制策略分别处理了模型中的不确定性和外界干扰, 所设计的控制器结构简单, 具有良好的鲁棒稳定性和实时跟踪精度.

参考文献(References):

- [1] SKJETNEA R, FOSSEN T I, KOKOTOVI' C P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 289 – 298.
- [2] FANG M C, LUO J H. On the track keeping and roll reduction of the ship in random waves using different sliding mode controllers[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(3/4): 479 – 488.
- [3] HU S S, YANG P H, JUANG J Y, et al. Robust nonlinear ship course-keeping control by H_∞ I/O linearization and μ -synthesis[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 13(1): 55 – 70.
- [4] 鲍其莲, 张炎华. 智能自适应控制及其在船舶操纵系统中的应用[J]. *船舶工程*, 1998, 20(2): 44 – 48. (BAO Qilian, ZHANG Yanhua. Intelligent adaptive control and its application on steering system of ships[J]. *Ship Engineering*, 1998, 20(2): 44 – 48.)
- [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 track-keeping control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 445 – 448.)
- [6] 杨盐生. 船舶减摇鳍系统变结构模糊自适应鲁棒控制[J]. *大连海事大学学报*, 2001, 27(4): 5 – 10. (YANG Yansheng. Variable structure fuzzy adaptive robust control applied to fin control for ship roll stabilization with uncertainties[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2001, 27(4): 5 – 10.)
- [7] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [8] 野本谦作. 船舶操纵性和控制及其在船舶设计中的应用[R]. 中国船舶科学研究中心, 1985. (NOMOTO K. Application of ship manoeuvrability and controllability to ship design[R]. *China ship scientific research center*, 1985.)
- [9] KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V, MORSE A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1991, 36(11): 1241 – 1253.
- [10] 申铁龙. 机器人鲁棒控制基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [11] KWAN C, LEWIS F L, DAWSON D M. Robust neural-network control of rigid-link electrically driven robots[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1998, 9(4): 581 – 588.
- [12] QU Z, DAWSON D M. *Robust Tracking Control of Robot Manipulators*[M]. NJ, USA: IEEE, 1995.
- [13] LUO W L, ZOU Z J. Identification of response models of ship maneuvering motion using support vector machines[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 12(6): 832 – 838.

作者简介:

罗伟林 (1973—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为船舶操纵与控制, E-mail: wlluo@sjtu.edu.cn;

邹早建 (1956—), 男, 博士, 教授, 研究方向为CFD、船舶操纵与控制, E-mail: zjzou@sjtu.edu.cn;

李铁山 (1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为非线性控制、模糊控制及其在船舶运动控制中的应用, E-mail: tieshanli@126.com.