

基于自适应模糊滑模控制的船舶航向控制器设计

刘文江^{1,2}, 隋青美¹, 周风余¹, 肖海荣²

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东交通学院信息工程系, 山东 济南 250023)

摘要: 针对船舶运动系统中固有的非线性、模型不确定性和风、浪、流等的干扰, 提出了自适应模糊滑模控制 (AFSMC) 策略解决船舶的航向控制问题. 通过采用模糊逻辑系统逼近系统未知函数, 将滑模控制技术与自适应模糊控制技术相结合, 设计了船舶航向 AFSMC 控制器. 在滑模边界层内应用 PI (proportional-integral) 控制代替滑模控制中的切换项, 削弱了滑模控制带来的抖振现象. 借助李亚普诺夫函数证明了船舶运动系统中的信号都一致有界并利用 Barbalat 引理证明了跟踪误差渐近收敛到零. 在参数摄动和外界干扰情况下进行了航向保持与改变仿真试验, 采用 AFSMC 控制器得到了与无摄动和无干扰情况下相似的输出响应. 实验结果表明, 所提控制器能有效地处理系统不确定性和外界干扰, 控制性能良好, 具有很强的鲁棒性.

关键词: 航向控制; 非线性系统; 滑模控制; 自适应模糊控制; 鲁棒性

中图分类号: U675.91, TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0411(2012)-02-0136-06

Controller Design Based on Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Ship Course

LIU Wenjiang^{1,2}, SUI Qingmei¹, ZHOU Fengyu¹, XIAO Hairong²

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Information Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China)

Abstract: Considering the nonlinear characteristics, modeling uncertainties and external disturbances such as wind, wave and flow in ship motion systems, an adaptive fuzzy sliding mode control (AFSMC) technology is presented to solve the ship course control problem. The fuzzy logic system is used to approximate the unknown system function and the adaptive fuzzy sliding mode controller is designed by combining sliding mode control technology with adaptive fuzzy control technology. The chattering problem of sliding mode control is relieved by adopting PI (proportional-integral) control instead of sliding mode control switching items within the boundary layer. Based on the Lyapunov function, it is theoretically proved that the controller makes all signals in the system of ship motion uniformly bounded, and using Barbalat's lemma, the tracking errors converge to zero. Simulation experiments on the course keeping and change in the presence of parameter perturbation and environment disturbances are conducted, and similar output responses with those under no perturbation and no interference circumstances by the controller based on AFSMC are obtained. The experiment results show that the proposed controller can handle system uncertainties and external disturbances effectively, and has superior controlling performance and strong robustness.

Keywords: ship course control; nonlinear system; sliding mode control; adaptive fuzzy control; robustness

1 引言 (Introduction)

船舶航向控制是船舶运动控制中的重要研究课题, 其性能直接影响着航行的经济性和安全性. 由于船舶运动具有大惯性、大时滞、非线性等特点, 又易受风、浪、流等干扰的影响, 航行条件 (如航速、装载情况和水深等) 的变化和测量的不精确性等因素都使船舶动态产生明显的不确定性^[1]. 因此, 船舶航向控制是一个复杂的非线性不确定性系统的控制问题. 传统的 PID 和自适应控制已不能满足当今

对船舶优化控制性能的要求, 研究强鲁棒性的船舶航向控制器在理论和实践上都具有重要意义.

为了解决系统的非线性和不确定性问题, 近年来, 很多新的鲁棒控制理论被运用于船舶航向控制中. 文 [2] 应用 H_∞ 控制实现了船舶的航向保持控制. 但是, 闭环系统的鲁棒性是通过选择权函数改善开环奇异值频率特性曲线实现的, 而权函数的选择非常困难. 文 [3] 设计了一种单进多出 (SIMO) 神经网络控制器实现船舶航迹保持, 但神经网络控制

的泛化能力有待于进一步研究, 控制的完备性问题未彻底解决. 由于滑模控制 (SMC) 对系统的不确定性和外部干扰具有强鲁棒性, 文 [4] 应用 SMC 实现了船舶的航向和航迹控制, 但 SMC 的高频抖振现象难以解决. 为了解决抖振问题, 文 [5] 采用模糊控制优化控制信号的办法, 设计了模糊滑模控制器 (FSMC), 仿真证明其性能明显优于常规的 SMC 控制. 根据万能逼近理论, 模糊逻辑可逼近任意非线性函数, 因此模糊控制 (FC) 非常适合参数未知系统和模型未知系统. 文 [6] 通过采用自适应律调整模糊控制的比例因子的方法, 设计了船舶航迹控制器, 表现出良好的控制性能; 文 [7] 结合 backstepping 方法, 提出了一种鲁棒自适应模糊控制方法, 实现了船舶直线航迹控制, 并具有较强的鲁棒性和抗干扰性.

文 [5-7] 及诸多文献证明, 将 SMC、FC 以及能寻求最优参数的自适应律相结合而成的自适应模糊滑模控制 (AFSMC) 对系统具有很强的鲁棒性和抗干扰性, 现已应用于多个领域 [8-11].

本文采用 AFSMC 来解决船舶航向中非线性、不确定性以及外部扰动问题. 通过自适应模糊推理系统对船舶动态系统中的未知非线性函数进行模糊逼近, 解决了船舶动态结构和参数不确定性问题及外部干扰; 通过采取 PI 控制代替滑模控制的切换项, 将切换项连续化, 减小滑模控制的抖振问题. 还应用李亚普诺夫直接法和 Barbalat 引理, 证明了系统的稳定性. 仿真结果显示, 该方案具有良好的动态性能和稳态性能, 并具有很强的鲁棒性.

2 系统描述 (System description)

2.1 船舶运动数学模型

船舶航向控制有 2 个功能: 航向保持和航向改变. 前者是使船舶在受到各种扰动时以最小的控制力保持在设定航向上; 后者希望以最小的超调迅速准确地跟踪新的设定航向. 船舶航向控制系统如图 1 所示. 其中, 航向 ψ 是被控量, 舵角 δ 是控制量. 舵机伺服系统一般都是由电气-液压驱动系统构成, 其功能是使驱动舵角达到水手或控制系统命令的期望角度. 其输入为命令舵角 $\delta_{c(t)}$, 输出为实际舵角 $\delta(t)$. 舵机系统有最大操舵角和最大操舵角速率限制, 对于大多数商船而言, 实际舵角及转舵速度限制为 $|\delta| \leq 35$ (单位: $^\circ$), $|\dot{\delta}| \leq 3$ (单位: $^\circ/\text{s}$). 本文采用简化的饱和特性模块表示舵机 [1].

在船舶航向自动舵设计中船舶运动模型一般采用野本 (Nomoto) 方程加上一个非线性项的形式:

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha\psi^3 = k\delta + d \quad (1)$$

其中, ψ 为航向角, δ 为舵角, T 、 α 为船舶模型参数, k 为系统增益, d 为外界干扰.

选取状态变量 $x_1 = \psi$, $x_2 = \dot{\psi}$, $u = \delta$, 则由式 (1) 得船舶运动的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u + d \end{cases} \quad (2)$$

$$y = x_1$$

式中, $f(x) = -\frac{1}{T}x_2 - \frac{\alpha}{T}x_2^3$, $g(x) = \frac{k}{T}$.

由于易受风、浪、流等外界干扰以及航行条件变化和未建模动态等不确定性的影响, 船舶动态方程中的非线性函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 是不确定的.

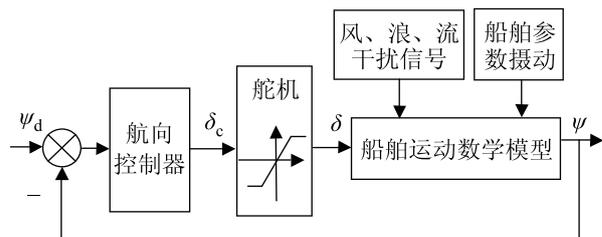


图 1 船舶航向控制系统框图

Fig. 1 Frame diagram of the ship course control system

2.2 船舶运动系统的外部干扰

船舶在大洋航行时会受到多种环境干扰, 如风、浪、流等. 一般地, 这些扰动可用以下 4 种扰动模型模拟 [12], 即:

(1) 风或流对船舶的恒值干扰: $d = 8$ (单位: $^\circ$).

(2) 周期性波浪干扰: $d = 8^\circ \sin(k\pi/10)$, 其中 k 为波浪波数.

(3) 风、浪、流综合正态分布随机干扰:

$$d = 4.58H_1 + 3.44H_2$$

式中, H_1 和 H_2 是两个相互独立的服从标准正态分布 $N(0, 1)$ 的伪随机变量.

(4) 风、浪、流综合均匀随机干扰:

$$d = 4.58H_3 + 3.44H_4$$

式中, H_3 和 H_4 是两个相互独立的服从 $[0, 1]$ 均匀分布的伪随机变量.

3 自适应模糊滑模控制 (AFSMC)

3.1 滑模变结构控制

考虑如下 n 阶 SISO (单入单出) 非线性对象:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, t) + g(x, t)u(t) + d(t) \\ y = x \end{cases} \quad (3)$$

其中, $f(x, t)$ 、 $g(x, t)$ 均为未知非线性函数, x 是状态矢量且假定是可测的, $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{n-1}]^T = [x_1, x_2,$

$\dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$; $u \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$, 分别是控制输入和系统输出; $d(t)$ 为未知外界干扰, 且 $|d(t)| \leq D$. 这里假定非线性系统 (3) 是可控的且控制增益 $g(\mathbf{x}, t) \neq 0$, 设 $g(\mathbf{x}, t) > 0$, 控制的目的是: 综合控制输入 $u(t)$ 使得当系统 (3) 存在外部干扰和模型不确定性时, 状态 \mathbf{x} 能够跟踪期望状态 \mathbf{x}_d .

定义跟踪误差:

$$\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T \in \mathbb{R}^n \quad (4)$$

则滑模面定义为

$$s(\mathbf{e}) = c_1 e + c_2 \dot{e} + \dots + c_{n-1} e^{(n-2)} + e^{(n-1)} = \mathbf{c}^T \mathbf{e} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1]^T$ 满足 Hurwitz 多项式条件. 在 $f(\mathbf{x}, t)$ 、 $g(\mathbf{x}, t)$ 已知的情况下, 滑模控制律设计为^[8]

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{1}{g(\mathbf{x}, t)} \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(\mathbf{x}, t) + \dot{\mathbf{x}}_d^{(n)} - \eta \text{sgns} \right) \\ &= u_{\text{eq}} - u_{\text{sw}} \end{aligned} \quad (6)$$

其中,

$$u_{\text{eq}} = \frac{1}{g(\mathbf{x}, t)} \left(-\sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - f(\mathbf{x}, t) + \dot{\mathbf{x}}_d^{(n)} \right) \quad (7)$$

$$u_{\text{sw}} = \frac{1}{g(\mathbf{x}, t)} \cdot \eta \text{sgns} \quad (8)$$

当 $f(\mathbf{x}, t)$ 、 $g(\mathbf{x}, t)$ 和干扰 $d(t)$ 未知时, 控制律式 (6) 不适用. 此外, 切换输入 u_{sw} 容易引起抖振现象. 为了解决这些问题, 应用模糊逻辑系统 \hat{f} 、 \hat{g} 逼近 f 、 g , 采用 PI 控制律解决抖振问题.

3.2 模糊逻辑系统

采用乘积推理机、单值模糊器和中心平均解模糊器, 模糊系统的输出为^[10-11]

$$\begin{aligned} y(\mathbf{x}) &= \frac{\sum_{l=1}^m y^l \left(\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i) \right)}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)} \\ &= \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\xi}^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,

$$\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) = [\xi^1(\mathbf{x}), \dots, \xi^m(\mathbf{x})]^T$$

$$\xi^l(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_i^l}(x_i)}$$

$$\boldsymbol{\theta} = [y^1, \dots, y^m]^T$$

定理 1 (万能逼近定理)^[11] 对于任何定义在致密集 $U \subset \mathbb{R}^n$ 上的连续函数 g 及任意的 $\varepsilon > 0$, 存在一个具有式 (9) 形式的模糊逻辑系统 $f = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$, 使得: $\sup_{\mathbf{x} \in U} |f(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x})| < \varepsilon$ 成立.

3.3 自适应模糊滑模控制

当 $f(\mathbf{x}, t)$ 、 $g(\mathbf{x}, t)$ 和干扰 $d(t)$ 未知时, 为了得到式 (6) 的控制律, 应用模糊逻辑系统 \hat{f} 、 \hat{g} 逼近 f 、 g . 同时为了降低抖振, 采用 PI 控制律代替 ηsgns . 连续的 PI 控制律输入输出形式为

$$u_p = \theta_{p1} z_1 + \theta_{p2} z_2 \quad (10)$$

其中, $z_1 = s$, $z_2 = \dot{s}$, θ_{p1} 、 θ_{p2} 为设计控制增益. 式 (10) 可改写为如下形式:

$$\hat{p}(z|\boldsymbol{\theta}_p) = \boldsymbol{\theta}_p^T \boldsymbol{\Psi}(z) \quad (11)$$

其中, $\boldsymbol{\theta}_p = [\theta_{p1}, \theta_{p2}]^T \in \mathbb{R}^2$, 为参数可调向量; $\boldsymbol{\Psi}^T(z) = [z_1, z_2] \in \mathbb{R}^2$. 则控制律变为

$$u = \frac{1}{\hat{g}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_g)} \left(-\hat{f}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_f) - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + \dot{\mathbf{x}}_d^{(n)} - \hat{p}(z|\boldsymbol{\theta}_p) \right) \quad (12)$$

其中 $\hat{f}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_f) = \boldsymbol{\theta}_f^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$, $\hat{p}(z|\boldsymbol{\theta}_p) = \boldsymbol{\theta}_p^T \boldsymbol{\Psi}(z)$, $\hat{g}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_g) = \boldsymbol{\theta}_g^T \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x})$ 为式 (9) 形式的模糊系统输出.

在式 (12) 中, 当状态在边界层之内时, 即 $|s| < \phi$ (ϕ 为边界层厚度), 采用 PI 控制律代替切换控制 u_{sw} , 用以消除抖振现象. 当状态在边界层之外, 即当 $|s| \geq \phi$ 时, 令其取饱和值 $D + \eta$.

定理 2 对于非线性系统 (3) 和控制律 (12), 当参数向量 $\boldsymbol{\theta}_f^T$ 、 $\boldsymbol{\theta}_g^T$ 和 $\boldsymbol{\theta}_p^T$ 根据自适应律:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\theta}}_f &= \gamma_1 s \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_g &= \gamma_2 s \boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}) u \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_p &= \gamma_3 s \boldsymbol{\Psi}(z) \end{aligned} \quad (13)$$

变化时, 闭环系统是有界的且跟踪误差渐近趋于 0.

证明 定义最优参数:

$$\boldsymbol{\theta}_f^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_f \in \Omega_f} \left(\sup_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} |\hat{f}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_f) - f(\mathbf{x}, t)| \right)$$

$$\boldsymbol{\theta}_g^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_g \in \Omega_g} \left(\sup_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} |\hat{g}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_g) - g(\mathbf{x}, t)| \right)$$

$$\boldsymbol{\theta}_p^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_p \in \Omega_p} \left(\sup_{z \in \mathbb{R}^2} |\hat{p}(z|\boldsymbol{\theta}_p) - u_{\text{sw}}| \right)$$

其中, Ω_f 、 Ω_g 和 Ω_p 分别为 $\boldsymbol{\theta}_f$ 、 $\boldsymbol{\theta}_g$ 和 $\boldsymbol{\theta}_p$ 的集合. 定义最小逼近误差:

$$\omega = f(\mathbf{x}, t) - \hat{f}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_f^*) + (g(\mathbf{x}, t) - \hat{g}(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}_g^*)) u$$

则:

$$\begin{aligned}
\dot{s} &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + x^{(n)} - x_d^{(n)} \\
&= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u + d(t) - x_d^{(n)} \\
&= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} + f(\mathbf{x}, t) - \hat{f}(\mathbf{x}|\theta_f) + \\
&\quad (g(\mathbf{x}, t) - \hat{g}(\mathbf{x}|\theta_g))u - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e^{(i)} - \hat{p}(z|\theta_p) + d(t) \\
&= f(\mathbf{x}, t) - \hat{f}(\mathbf{x}|\theta_f) + (g(\mathbf{x}, t) - \hat{g}(\mathbf{x}|\theta_g))u - \hat{p}(z|\theta_p) + \\
&\quad d(t) + \omega \\
&= \hat{f}(\mathbf{x}|\theta_f^*) - \hat{f}(\mathbf{x}|\theta_f) + (\hat{g}(\mathbf{x}|\theta_g^*) - \hat{g}(\mathbf{x}|\theta_g))u - \\
&\quad \hat{p}(z|\theta_p) + \hat{p}(z|\theta_p^*) - \hat{p}(z|\theta_p) + d(t) + \omega \\
&= \varphi_f^T \xi(\mathbf{x}) + \varphi_g^T \xi(\mathbf{x})u + \varphi_p^T \Psi(z) - \hat{p}(z|\theta_p^*) + \\
&\quad d(t) + \omega
\end{aligned}$$

其中, $\varphi_f = \theta_f^* - \theta_f$, $\varphi_g = \theta_g^* - \theta_g$, $\varphi_p = \theta_p^* - \theta_p$. 定义李亚普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} \left(s^2 + \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T \varphi_f + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T \varphi_g + \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T \varphi_p \right) \quad (14)$$

其中, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为正常数. 则:

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g + \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T \dot{\varphi}_p \\
&= s(\varphi_f^T \xi(\mathbf{x}) + \varphi_g^T \xi(\mathbf{x})u + \varphi_p^T \Psi(z) - \hat{p}(z|\theta_p^*) + \\
&\quad d(t) + \omega) + \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g + \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T \dot{\varphi}_p \\
&= s\varphi_f^T \xi(\mathbf{x}) + \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T \dot{\varphi}_f + s\varphi_g^T \xi(\mathbf{x})u + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T \dot{\varphi}_g + \\
&\quad s\varphi_p^T \Psi(z) + \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T \dot{\varphi}_p - s\hat{p}(z|\theta_p^*) + s\omega + sd(t) \\
&= \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T (\gamma_1 s \xi(\mathbf{x}) + \dot{\varphi}_f) + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T (\gamma_2 s \xi(\mathbf{x})u + \dot{\varphi}_g) + \\
&\quad \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T (s \Psi(z) + \dot{\varphi}_p) - s\hat{p}(z|\theta_p^*) + s\omega + sd(t) \\
&\leq \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T (\gamma_1 s \xi(\mathbf{x}) + \dot{\varphi}_f) + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T (\gamma_2 s \xi(\mathbf{x})u + \dot{\varphi}_g) + \\
&\quad \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T (s \Psi(z) + \dot{\varphi}_p) - s(D + \eta) \operatorname{sgn}s + sd(t) + s\omega \\
&< \frac{1}{\gamma_1} \varphi_f^T (\gamma_1 s \xi(\mathbf{x}) + \dot{\varphi}_f) + \frac{1}{\gamma_2} \varphi_g^T (\gamma_2 s \xi(\mathbf{x})u + \dot{\varphi}_g) + \\
&\quad \frac{1}{\gamma_3} \varphi_p^T (s \Psi(z) + \dot{\varphi}_p) - \eta|s| + s\omega
\end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\dot{\varphi}_f = -\dot{\theta}_f$, $\dot{\varphi}_g = -\dot{\theta}_g$, $\dot{\varphi}_p = -\dot{\theta}_p$, 将式 (13) 代入式 (15) 得 $\dot{V} \leq s\omega - \eta|s|$. 根据模糊逼近理论, 自适应模糊控制系统可实现逼近误差 ω 非常小, 故:

$$\dot{V} \leq s\omega - \eta|s| \leq 0 \quad (16)$$

这表明 $e(t)$ 和 s 是有界的, 由于期望信号 x_d 是有界的, 所以系统状态 \mathbf{x} 也是有界的. 假定 $|s| \leq \eta_s$, 则式

(16) 改写为 $\dot{V} \leq s\omega - \eta|s| \leq \eta_s |\omega| - \eta|s|$, 两边积分, 得 $\int_0^T |s| d\tau \leq \frac{1}{\eta} |V(0)| + |V(T)| + \frac{\eta_s}{\eta} \int_0^T |\omega| d\tau$, 由 Barbalat 引理知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s(t) \rightarrow 0$, 证明系统稳定并且跟踪误差渐近趋于 0.

4 船舶航向 AFSMC 控制器设计方案 (Design scheme of ship course controller based on AFSMC)

船舶航向 AFSMC 控制器设计方案如下:

(1) 取切换函数为 $s = c_1 e + \dot{e}$.

(2) 选取适当的 PI 控制初始值 $\theta_p(0)$, 选取学习参数 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$.

(3) 取 5 种隶属函数进行模糊化:

$$\begin{aligned}
\mu_{NM}(x_i) &= \exp\left(-((x_i + \pi/6)/(\pi/24))^2\right) \\
\mu_{NS}(x_i) &= \exp\left(-((x_i + \pi/12)/(\pi/24))^2\right) \\
\mu_{ZO}(x_i) &= \exp\left(-((x_i)/(\pi/24))^2\right) \\
\mu_{PS}(x_i) &= \exp\left(-((x_i - \pi/12)/(\pi/24))^2\right) \\
\mu_{PM}(x_i) &= \exp\left(-((x_i - \pi/6)/(\pi/24))^2\right)
\end{aligned}$$

则用于逼近 $f(x), g(x)$ 的模糊规则分别有 25 条.

(4) 采用乘积推理机, 单值模糊器和中心平均解模糊器, 得到式 (9) 形式的模糊系统输出 $\hat{f}(\mathbf{x}|\theta_f)$ 和 $\hat{g}(\mathbf{x}|\theta_g)$, θ_f 和 θ_g 是 25×1 的向量.

(5) 构建式 (12) 形式的根据自适应规律变化的控制律控制船舶运动.

5 仿真结果 (Simulation results)

为验证本文所设计的船舶航向 AFSMC 控制器的性能, 对一艘长 45 m 的船舶进行航向保持和跟踪控制的仿真研究. 当该船以 5 m/s 的速度航行时, 方程 (2) 中的船舶运动模型动态参数为: 时间参数 $T = 31$ s, $k = 0.5$, $\alpha = 0.4$ s². 选取仿真参数 θ_f^T, θ_g^T 的初始值分别为 **0.10, 0.10** (向量中各元素都为 0.10), θ_{p1}, θ_{p2} 的初始值分别为 10、4; 取 $c_1 = 5$, $\gamma_1 = 5$, $\gamma_2 = 1$, $\gamma_3 = 10$; 取滑模边界层厚度 $\phi = 0.3$; 船舶航向初始状态为 $\mathbf{x} = [0, 0]$. 仿真分为航向保持和航向改变两种情况, 在同一组参数下进行. 为了对照比较, 和 PID 控制在同一个环境里同时进行了仿真, PID 控制参数为 $k_p = 10$, $k_i = 0.005$, $k_d = 0.04$.

考虑到船舶模型参数随航速、装载情况和环境扰动而变化, 为了验证鲁棒性, 将上述船舶运动模型参数摄动为前述参数值的 2 倍, 用相同的设计参数也进行仿真. 具体仿真情况如下:

(1) 航向保持仿真实验

仿真实验如图 2、3 所示. 图例中, AFSMC 表示在 AFSMC 控制下的输出, PID 表示在 PID 控制下的输出(下同).

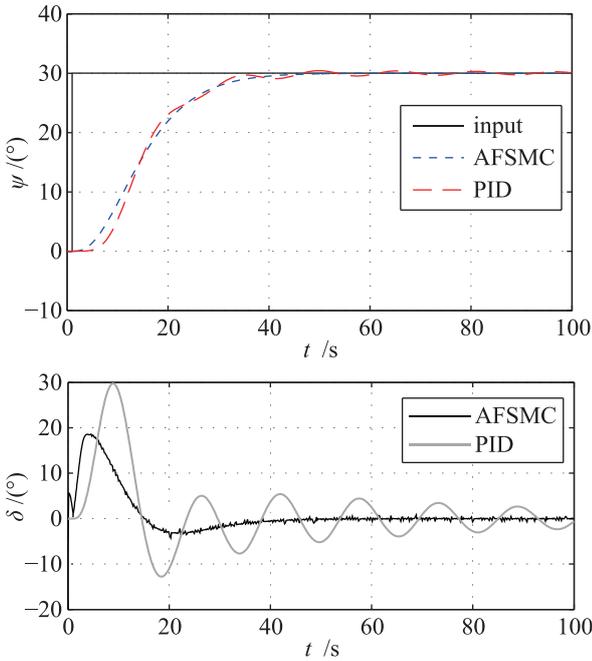


图 2 无干扰、航向设定 30° 时航向和舵角输出

Fig.2 The outputs of the ship course and the ship rudder angle without disturbance when expected course is 30°

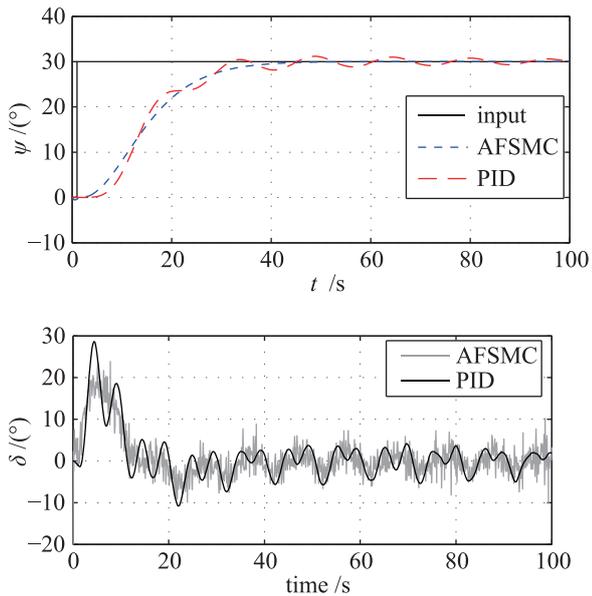


图 3 存在干扰和参数改变、航向设定 30° 时航向和舵角输出

Fig.3 The outputs of the ship course and the rudder angle with parameter changing and disturbances when expected course is 30°

从图 2 和图 3 可以看出, 无论有无干扰和参数扰动, 与 PID 相比, AFSMC 控制效果表现良好, 航向保持性能良好, 输出无超调且静态误差几乎为 0; 舵角变化合理; 鲁棒性和抗干扰性能力较强.

(2) 航向改变仿真实验

航向改变仿真如图 4、5 所示.

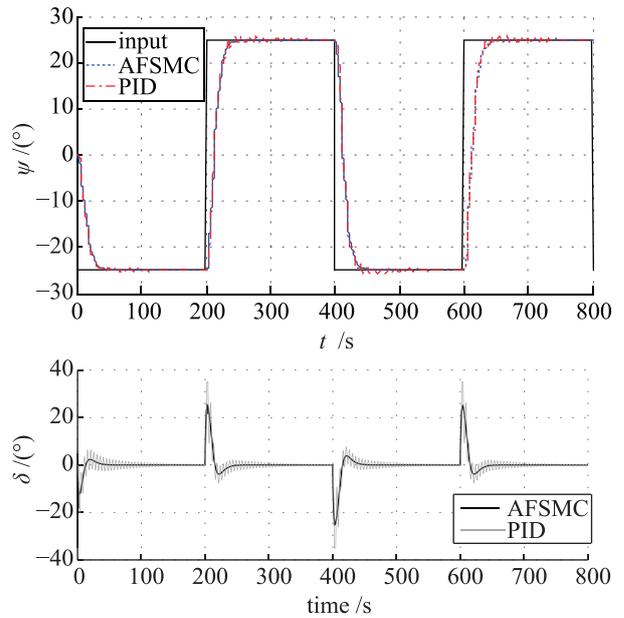


图 4 无干扰情况下航向改变时的航向和舵角输出

Fig.4 The outputs of the ship course and the rudder angle without disturbances when expected course is changing

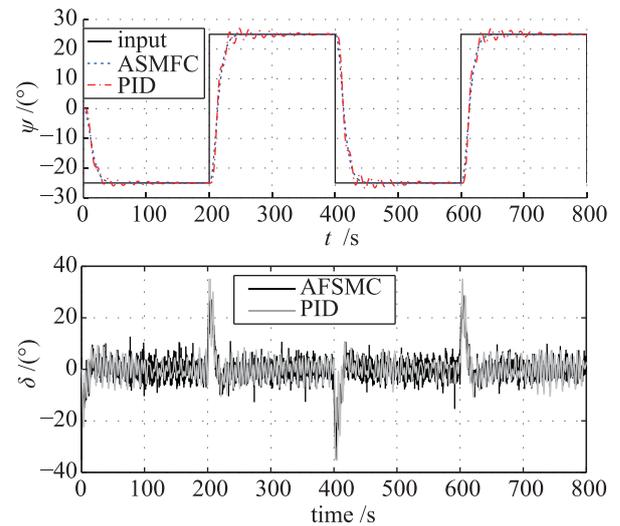
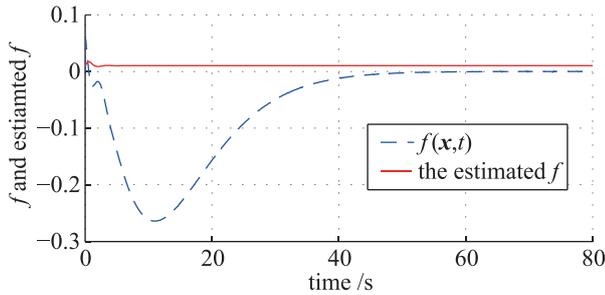
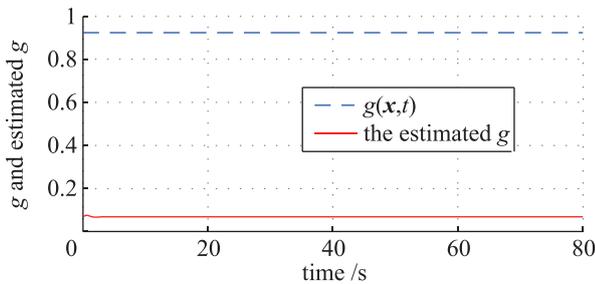


图 5 存在干扰和参数改变、航向改变时的航向和舵角输出

Fig.5 The outputs of the ship course and the rudder angle with parameter changing and disturbances when expected course is changing

从图 4、5 可以看出, 在航向连续变化时, 无论有无干扰和参数扰动, 与 PID 控制相比, AFSMC 控制器都能使船舶精确跟踪期望航向, 输出无超调, 舵角动态响应较快, 鲁棒性和抗干扰性能力较强.

(3) 航向保持控制时, 未知函数 $f(x, t)$ 、 $g(x, t)$ 及 $\hat{f}(x, t)$ 、 $\hat{g}(x, t)$ 的变化曲线如图 6、7 所示.

图 6 $f(\mathbf{x},t)$ 和 $\hat{f}(\mathbf{x},t)$ 的变化Fig.6 The changes of $f(\mathbf{x},t)$ and $\hat{f}(\mathbf{x},t)$ 图 7 $g(\mathbf{x},t)$ 和 $\hat{g}(\mathbf{x},t)$ 的变化Fig.7 The changes of $g(\mathbf{x},t)$ and $\hat{g}(\mathbf{x},t)$

从图 6 和图 7 可以看出, $\hat{f}(\mathbf{x},t)$ 与 $f(\mathbf{x},t)$ 的误差几乎能够收敛到 0, 而 $\hat{g}(\mathbf{x},t)$ 与 $g(\mathbf{x},t)$ 之间的误差却一直存在, 这与定义的最小逼近误差是一致的. 说明自适应模糊逼近系统不必逼近参数的真实值, 也能实现系统输出的完全跟踪.

6 结论 (Conclusions)

从以上仿真结果可知: 采用自适应模糊推理系统能够对船舶动态系统中的未知非线性函数进行模糊逼近, 从而可以解决船舶动态结构和参数不确定性问题; 采用 PI 控制律代替滑模控制的切换项, 能有效避免常规 SMC 控制的抖振现象; AFSMC 使航向保持精度高, 无超调, 航向改变控制过程快速、平滑, 并对船舶非线性特性以及参数摄动和外部环境干扰均表现出了很强的鲁棒性, 是一种较理想的船舶航向控制器.

参考文献 (References)

[1] Fossen T I. Guidance and control of ocean vehicles[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc., 1994.

- [2] 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, 2003, 13(1): 55-70.
- [3] Zhang Y, Hearn G E, Sen P. A neural network approach to ship track-keeping control[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(4): 513-527.
- [4] 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.
- [5] 高健, 陈高阳. 船舶航向模糊滑模控制及仿真 [J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2010, 24(4): 372-376.
- Gao J, Chen G Y. Fuzzy sliding mode control and simulation for ship's course steering[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 24(4): 372-376.
- [6] Velagic J, Vukic Z, Omerdic E. Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(4): 433-443.
- [7] 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 T S, Yang Y S, Hong B G, et al. Robust adaptive fuzzy design for ships track-keeping control[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(3): 445-448.
- [8] Ho H F, Wong Y K, Rad A B. Adaptive fuzzy sliding mode control design: Lyapunov approach[C]//5th Asian Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 1502-1507.
- [9] Wai R J, Lin C M, Hsu C F. Adaptive fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 143(2): 295-310.
- [10] Moghaddam J J, Bagheri A. An adaptive neuro-fuzzy sliding mode based genetic algorithm control system for under water remotely operated vehicle[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(1): 647-660.
- [11] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146-155.
- [12] 周凤余, 王伟, 单金明. 基于 ADRC 的船舶航向控制器设计与仿真研究 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39(1): 57-63.
- Zhou F Y, Wang W, Shan J M. Research on design and simulation of ship course controller based on ADRC[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(1): 57-63.

作者简介:

刘文江 (1971-), 男, 博士生, 副教授. 研究领域为船舶运动控制, 非线性控制理论与应用.