

船舶航向非线性系统的多滑模自适应模糊控制

袁 雷, 吴汉松

(海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要:针对参数未知的船舶航向非线性控制系统数学模型,在考虑舵机伺服机构特性的情况下,船舶航向控制问题就成为一个虚拟控制系数未知的非匹配不确定非线性控制问题.基于多滑模设计方法和模糊逻辑系统的逼近能力,提出了一种多滑模自适应模糊控制算法,通过引入非连续投影算法和积分型 Lyapunov 函数,提高了系统在抑制参数漂移、控制器奇异等方面的能力.借助 Lyapunov 函数证明了所设计控制器使最终的闭环非匹配不确定船舶运动非线性系统中的所有信号有界,且跟踪误差收敛到零.仿真研究表明:该算法与传统的 PID 控制相比,具有较好的跟踪能力和自适应能力.

关键词:船舶航向控制;非线性系统;多滑模控制;模糊控制

中图分类号: TP273;U664 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2010)04-0308-05

Multiple sliding mode adaptive fuzzy controller for nonlinear marine autopilot systems

YUAN Lei, WU Han-song

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033, China)

Abstract: When a ship course controller must deal with unknown parameters, the maneuvers of the ship must be described using an unmatched and uncertain nonlinear mathematical model with unknown virtual control coefficients and unknown parameters. To deal with this situation, an adaptive fuzzy control algorithm with multiple sliding modes was proposed. It combined multiple sliding mode design technology with the approximation capability of a fuzzy logic system. In order to solve the problem of parameter drift and the controller's singularity problem, a non-continuous projection algorithm and an integral-type Lyapunov function were employed in the proposed algorithm. By means of the Lyapunov function, it was theoretically proven that the proposed controller makes all signals in the resulting closed-loop adaptive system uniformly bounded, with tracking error converging to zero. The simulation results showed that, compared to conventional proportional-integral-derivative (PID) controllers, the controller discussed in this paper provided better adaptability and tracking capabilities.

Keywords: ship autopilot control; nonlinear system; multiple sliding mode control; fuzzy control

自动舵是操纵船舶的关键设备,它的性能直接影响船舶航行的经济性和安全性.但是由于航速及装载的变化会引起船舶运动模型的参数摄动,船舶航向控制系统模型中存在明显的参数不确定性^[1-3].如果在船舶航向控制器设计中考虑舵机的影响及参数不确定性,则船舶航向控制便成为一个非匹配不确定的控制问题,特别是其虚拟控制系数未知^[4].近年来,不确定性非线性系统的自适应控制和滑模控制得到较大的发展.特别是反演法

(backstepping),它在实现船舶不确定非线性系统的鲁棒控制或自适应控制方面有着明显的优越性.但是,反演法在虚拟控制量求导过程中导致了系统方程微分项的膨胀,控制器设计非常复杂.滑模控制算法由于其设计简单,且抗干扰能力强,所以得到了广泛的应用.为此,文献[5]将多滑模模糊控制与自适应控制相结合,对虚拟控制系数为1的严格反馈非线性系统,提出了一种多滑模自适应模糊控制算法,其优点是消除了传统反演法设计中存在的变量膨胀问题,但是针对虚拟控制系数不为1或者控制系数未知的情况下却不能很好的解决.

本文在考虑船舶航向模型的非线性,并假设模

型的参数未知的情况下,用模糊逻辑系统逼近模型中的未知非线性函数,得到的模型更接近于实际模型,将多滑模控制与自适应模糊控制相结合,解决了非匹配不确定非线性船舶航向控制系统的虚拟控制系数未知的问题,拓宽了文献[5]所提算法的使用范围,并且给出了船舶航向自动舵的设计方法,进行了仿真研究,结果证明该算法是有效可行的,并且控制效果良好。

1 系统描述

本文采用 Norbbin 模型描述船舶操纵非线性运动^[4]。

$$Tr + r + \alpha r^3 = k\delta. \quad (1)$$

式中: r 为首摇角速度, δ 为舵角, T 为时间常数, k 为增益, α 为 Norbbin 系数,其值可由螺旋试验确定。航向角 ψ 和首摇角速率 r 的关系为

$$\dot{\psi} = r. \quad (2)$$

由于装载及航速变化等会造成船舶运动模型参数的变化,在设计中假设模型参数 T 、 k 、 α 均未知,但为常数。

舵角伺服系统^[6]是由比较器、功率放大器、变量泵、液压舵机及舵角反馈装置组成,它是一个小闭环随动系统,其数学模型可简化为

$$T_E \dot{\delta} + \delta = K_E \delta_E. \quad (3)$$

式中: δ_E 为航向控制器发出的舵令, δ 为实际舵角, K_E 为舵机控制增益, T_E 为舵机时间常数。考虑 ψ 为航向角,选取状态变量 $x_1 = \psi$, $x_2 = r$, $x_3 = \delta$,由式(1)、(2)和(3)可得到包含舵机特性的船舶操纵运动数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_2) + bx_3, \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_E}x_3 + \frac{K_E}{T_E}\delta_E, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(x_2) = -\frac{1}{T}x_2 - \frac{\alpha}{T}x_2^3$ 为未知的非线性函数, $b = K/T$ 为未知参数。可见,这是一个单输入单输出的虚拟控制系数未知的非匹配不确定非线性系统。特别在式(1)中,对于直线运动稳定性的船舶, $T > 0$;而对于不具有直线运动的稳定性的船舶, $T < 0$;本文假设虚拟控制系数 $T/K = b$ 为未知常数,但其符号已知。

在航向改变的操纵中,船舶所期望的首向角 ψ_c ,是将设定的首向角参考信号 ψ_d 进行预滤波,从而可保证避免大的阶跃输入信号引起的数值解方面

的困难。本文选取预滤波环节如下:

$$\psi_d = \frac{\omega_n^3}{(s + \omega_n)^3} \psi_c. \quad (5)$$

式中: ω_n 是设计参数控制响应速度。三阶的参考模型保证了 ψ_d 及其三阶导数均存在且有界。

2 基于模糊逻辑的多滑模自适应控制器设计

2.1 模糊逻辑系统

假设模糊逻辑系统的规则有下列语句描述:

IF x_1 is A_1^j and x_2 is $A_2^j \cdots$ and x_n is A_n^j THEN y is B^j .

采用单点模糊、乘积推理和中心平均解模糊法构建模糊系统,则模糊系统的输出为

$$y(x) = \frac{\sum_{j=1}^m y^j \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}. \quad (6)$$

将式(6)表示成如(7)形式:

$$y(x) = \xi^T \lambda(x). \quad (7)$$

式中: $\xi = [y^1 \ y^2 \cdots y^m]$ 为参数矢量;

$$\lambda^k(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i)}{\sum_{j=1}^m \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}, k = 1, 2, \cdots, m,$$

$$\lambda(x) = [\lambda^1(x) \ \lambda^2(x) \ \cdots \ \lambda^m(x)]^T.$$

式中: $\lambda(x)$ 为模糊基函数矢量。

然而,在利用模糊系统来逼近一个连续函数时,通常存在这样一个问题:是否存在一个模糊系统可以任意逼近连续函数,对于这个问题,有下述引理。

引理^[7]: 设 $F(x)$ 是紧集 $U \subset R^r$ 上的连续函数,对于 $\forall \varepsilon > 0$ 存在一个形如式(7)的模糊系统,使得下式成立:

$$\sup |F(x) - \xi^T \lambda(x)| \leq \varepsilon.$$

根据引理可知,函数 $F(x)$ 可表示为

$$F(x) = \xi^* \lambda(x) + \varepsilon. \quad (8)$$

式中: ε 为逼近误差; ξ^* 为优化参数矢量 $\xi^* = \arg \min_{\xi \in R^r} \{ \sup_{x \in U} |F(x) - \xi^T \lambda(x)| \}$ 。

由于系统逼近误差的存在,在参数自适应调节律的设计过程中,必须考虑参数漂移问题,下面引入非连续投影算法的定义^[8]。

定义 非连续投影算法 $\text{Proj}_{\hat{\xi}_i}(\cdot)$ 定义为

$$\text{Proj}_{\hat{\xi}_i}(\cdot) = \begin{cases} \hat{\xi}_i = \xi_{i\min} & (\cdot < 0), \\ 0 & \left\{ \begin{aligned} \hat{\xi}_i = \xi_{i\min} & (\cdot < 0), \\ \hat{\xi}_i = \xi_{i\max} & (\cdot > 0). \end{aligned} \right. \\ \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

该算法具有如下性质:

1): $\hat{\xi}_i \in \Omega_{\hat{\xi}_i} = \{ \hat{\xi}_i | \xi_{i\min} \leq \hat{\xi}_i \leq \xi_{i\max} \}$;

2) : $\tilde{\zeta}_i^T (\text{Proj}_{\tilde{\zeta}_i}(\cdot) - (\cdot)) \leq 0, \forall (\cdot), \tilde{\zeta} = \tilde{\zeta} - \zeta$.

2.2 多滑模自适应模糊控制器设计

从系统式(4)中看出,控制目标是设计控制器,使输出航向能够稳定快速地跟踪期望航向 ψ_d 航行,且跟踪误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} [x_1(t) - \psi_d(t)] = 0$. 在设计过程中,定义3个滑模面 $z_i = x_i - \psi_{d_i}, i=1,2,3$,这里 ψ_{d_i} 表示状态变量的期望值,其中 $\psi_{d_1} = \psi_d$. 其设计步骤如下:

1) 对第1个滑模面,即 $z_1 = x_1 - \psi_d$ 求导,并考虑式(4),可得

$$\dot{z}_1 = x_2 - \dot{\psi}_d = z_2 + \psi_{d_2} - \dot{\psi}_d. \quad (10)$$

为了使式(10)镇定, ψ_{d_2} 设计为

$$\dot{\psi}_{d_2} = -c_1 z_1 + \dot{\psi}_d. \quad (11)$$

式中: $c_1 > 0$ 为设计参数.

由式(10)和式(11)可得

$$z_1 \dot{z}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2. \quad (12)$$

2) 对第2个滑模面,即 $z_2 = x_2 - \psi_{d_2}$ 求导,并考虑式(4),可得

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= f(x_2) + b x_3 - \dot{\psi}_{d_2} = \\ & f(x_2) + b(z_3 + \psi_{d_3}) - \dot{\psi}_{d_2}. \end{aligned} \quad (13)$$

由于函数 $f(x_2)$ 是未知的,可采用模糊逻辑系统去逼近它,根据引理可知:

$$f(x_2) = \zeta_1^{*T} \lambda_1(x_1, x_2) + \varepsilon_1. \quad (14)$$

为了使式(13)镇定,将 ψ_{d_3} 设计为

$$\dot{\psi}_{d_3} = \hat{\phi} [\dot{\psi}_{d_2} - \hat{\zeta}_1^T \lambda_1 - c_2 z_2 - k_1 \text{sgn}(z_2)]. \quad (15)$$

式中: $k_1, c_2 > 0$ 为设计参数; $\hat{\zeta}_1$ 为模糊逻辑系统参数矢量 ζ_1^* 的估计值; $\hat{\phi}$ 为 $\phi = 1/b$ 的估计值,此设计中无须对 b 直接估计,而是引入参数 $\phi = 1/b$, ϕ 的引入可以避免在设计过程中出现的奇异值现象.

式(15)中,参数 $\hat{\zeta}_1$ 和 $\hat{\phi}$ 的自适应律分别设计为

$$\dot{\hat{\zeta}}_1 = r_1 \text{Proj}_{\hat{\zeta}_1}(z_2 \lambda_1), \quad (16)$$

$$\dot{\hat{\phi}} = -\rho \text{sgn}(b) z_1 z_2. \quad (17)$$

式中: $r_1 > 0, \rho > 0$ 为设计常数.

对式(11)进行求导,并考虑式(10)可得:

$$\dot{\psi}_{d_2} = \ddot{\psi}_d + c_1^2 z_1 - c_1 \dot{\psi}_d. \quad (18)$$

3) 构造 $V_3 = \int_0^{\infty} \sigma d\sigma$, 其中 σ 为变量. 考虑第3个滑模面 $z_3 = x_3 - \psi_{d_3}$ 和式(4),对 V_3 求导,可得:

$$\dot{V}_3 = z_3 \dot{z}_3 = z_3 \left(\frac{K_E}{T_E} \delta_E - \frac{1}{T_E} x_3 - \dot{\psi}_{d_3} \right). \quad (19)$$

采用模糊逻辑系统来逼近下面的非线性函数,根据引理可知

$$\frac{1}{T_E} x_3 - \dot{\psi}_{d_3} = \zeta_2^{*T} \lambda_2(x_1, x_2, x_3) + \varepsilon_2. \quad (20)$$

则实际控制器 δ_E 可设计为

$$\delta_E = \frac{T_E}{K_E} (-\hat{\zeta}_2^T \lambda_2 - c_3 z_3 - k_2 \text{sgn}(z_3)). \quad (21)$$

式中: $k_2, c_3 > 0$ 为设计常数, $\hat{\zeta}_2$ 为 ζ_2^* 的估计值.

式(21)中的参数 $\hat{\zeta}_2$ 的自适应律设计为

$$\dot{\hat{\zeta}}_2 = r_2 \text{Proj}_{\hat{\zeta}_2}(z_3 \lambda_2). \quad (22)$$

式中: $r_2 > 0$ 为设计常数. 由式(19)和式(21)可得:

$$\dot{V}_3 = -c_3 z_3^2 - k_2 |z_3| + \varepsilon_2 z_3. \quad (23)$$

3 稳定性分析

下面给出本文的一个重要结论.

定理 针对船舶运动非线性系统(4),假设参数在满足 $|\varepsilon_1| \leq k_1, |\varepsilon_2| \leq k_2$ 的情况下,在控制器式(21)以及自适应律式(16)、式(17)和式(22)的共同作用下,整个闭环系统所有状态是有界的,且跟踪误差收敛于零.

证明 1 构造全局 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2r_1} \tilde{\zeta}_1^T \tilde{\zeta}_1 + \frac{|b|}{2\rho} \tilde{\phi}^2 + V_3 + \frac{1}{2r_2} \tilde{\zeta}_2^T \tilde{\zeta}_2$$

式中: $\tilde{\zeta}_1 = \hat{\zeta}_1 - \zeta_1^*, \tilde{\zeta}_2 = \hat{\zeta}_2 - \zeta_2^*, \tilde{\phi} = \phi - \hat{\phi}$,

且 $\phi = 1/b; r_1, r_2, \rho > 0$ 为设计参数.

对 V 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 + \frac{1}{r_1} \tilde{\zeta}_1^T \dot{\tilde{\zeta}}_1 - \\ & \frac{|b|}{\rho} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} + \dot{V}_3 + \frac{1}{r_2} \tilde{\zeta}_2^T \dot{\tilde{\zeta}}_2. \end{aligned} \quad (24)$$

将式(12)和式(23)代入式(24)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 - k_1 |z_2| - k_2 |z_3| + \\ & z_1 z_2 + b z_2 z_3 + \varepsilon_1 z_2 + \varepsilon_2 z_3 + \tilde{\zeta}_1^T (z_2 \lambda_1 - \\ & \frac{1}{r_1} \dot{\tilde{\zeta}}_1) + \tilde{\zeta}_2^T (z_3 \lambda_2 - \frac{1}{r_2} \dot{\tilde{\zeta}}_2) - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}}. \end{aligned} \quad (25)$$

将式(16)和式(22)代入式(25)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 - k_1 |z_2| - k_2 |z_3| + \\ & \varepsilon_1 z_2 + \varepsilon_2 z_3 + z_1 z_2 + b z_2 z_3 - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} = -c_1 z_1^2 - \\ & c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 - k_1 |z_2| - k_2 |z_3| + \varepsilon_1 z_2 + \varepsilon_2 z_3 + \omega. \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $\omega = z_2(z_1 + \hat{b} z_3) - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} - (\frac{1}{\hat{\phi}} - \frac{1}{\phi}) z_2 z_3$. 设计 $z_3 = -\hat{\phi} z_1$, 并代入 ω 中可得

$$\begin{aligned} \omega &= -\frac{|b|}{\rho} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} - (\frac{1}{\hat{\phi}} - \frac{1}{\phi}) \hat{\phi} z_1 z_2 = - \\ & \rho^{-1} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} (|\hat{\phi}|^{-1} \phi \dot{\tilde{\phi}} + \rho z_1 z_2). \end{aligned} \quad (27)$$

由 $\phi |\hat{\phi}|^{-1} = \text{sgn}(\phi) = \text{sgn}(b)$, 可得

$$\omega = -\rho^{-1} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} (\text{sgn}(b) \hat{\phi} + \rho z_1 z_2). \quad (28)$$

将式(17)代入(28)式并考虑式(26)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 - k_1 |z_2| - k_2 |z_3| + \varepsilon_1 z_2 + \varepsilon_2 z_3 \leq - \\ & c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 - k_1 |z_2| - k_2 |z_3| + |\varepsilon_1| |z_2| + |\varepsilon_2| |z_3| = - \end{aligned}$$

$$c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 - (k_1 + \varepsilon_1) |z_2| - (k_2 + \varepsilon_2) |z_3| \leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 = V_1 \leq 0.$$

因 $\dot{V} \leq 0$, 即

$$V[z_1(t) \ z_2(t) \ z_3(t) \ \tilde{\xi}_1(t) \ \tilde{\xi}_2(t) \ \tilde{\phi}(t)] \leq V[z_1(0) \ z_2(0) \ z_3(0) \ \tilde{\xi}_1(0) \ \tilde{\xi}_2(0) \ \tilde{\phi}(0)]$$

这表明 $z_1(t), z_2(t), z_3(t), \tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t), \tilde{\phi}(t)$ 有界, 那么也表明了 $\tilde{\xi}_1(t), \tilde{\xi}_2(t), \tilde{\phi}(t)$ 也有界, 进而可以保证下式的成立

$$|\varepsilon_1| \leq k_1, |\varepsilon_2| \leq k_2. \quad (29)$$

从而可以说明定理中假设的合理性.

证明 2 定义函数

$$W(t) = c_1 z_1^2 + c_2 z_2^2 + c_3 z_3^2 = -V_1. \quad (30)$$

对 $W(t)$ 两边求积分可得

$$\int_0^t W(\tau) d\tau = V_1[z_1(0) \ z_2(0) \ z_3(0)] - V_1[z_1(t) \ z_2(t) \ z_3(t)]$$

因为 $V_1[z_1(0) \ z_2(0) \ z_3(0)]$ 有界, 并且 $V_1[z_1(t) \ z_2(t) \ z_3(t)]$ 也有界, 且非增, 因此下式一定成立

$$\int_0^t W(\tau) d\tau < \infty. \quad (31)$$

显然 $W(\tau)$ 也有界, 因此根据 Barbalat 引理, 有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(t) = 0. \quad (32)$$

这表明当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_1(t), z_2(t), z_3(t)$ 将收敛到 0, 因此必有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (x_1(t) - \psi_d(t)) = 0.$$

故跟踪误差收敛到零.

证毕.

4 仿真研究

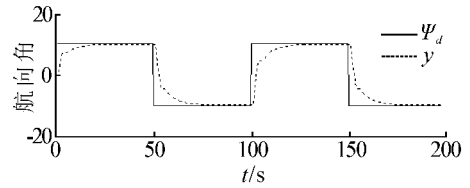
以某船为例进行仿真研究. 仿真参数如下: 船长 $L=126$ m, 船宽 $B=20.8$ m, 满载吃水 $C=8.0$ m, 方形系数 $C_b=0.681$, 航速 $V=7.2$ m/s, 通过计算可得 $K=0.48, T=216.8, \alpha=30$. 舵机模型(3)的参数为 $T_E=2.5, K_E=1$. 应用本文提出的多滑模自适应模糊控制算法, 在 Matlab 环境下编程进行系统(4)的跟踪控制, 跟踪信号是 1 个周期为 100 s, 以 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 变化的方波信号. 在程序设计中本文选取 5 种隶属函数进行模糊化:

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

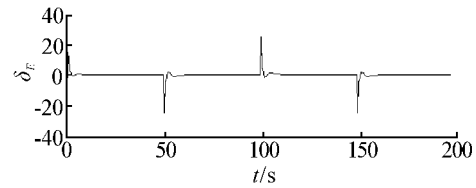
则分别有 25 条模糊规则逼近文中的 2 个非线性函数.

选取设计参数: $c_1=0.35, c_2=12, c_3=3.2, k_1=10, k_2=5$; 并假设各状态的初始值为 $x_1(0)=x_2(0)=$

$x_3(0)=\dot{\phi}(0)=0$, 并且为了检验本文所提出控制算法的优劣, 将多滑模模糊控制算法与传统的 PID 控制算法进行了仿真比较, 其仿真结果如图 1~4 所示.



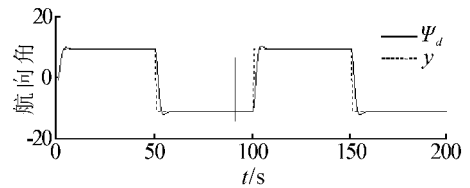
(a) 期望航向 ψ_d 角与实际航向角 γ 的变化曲线



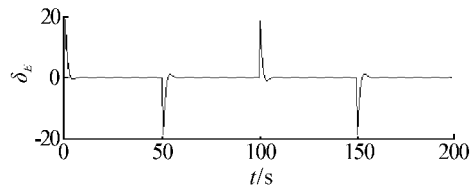
(b) 舵角的变化曲线

图 1 传统 PID 控制的情况下

Fig1. Traditional PID control



(a) 期望航向 ψ_d 角与实际航向角 γ 的变化曲线



(b) 舵角的变化曲线

图 2 多滑模模糊控制的情况下

Fig2. Multiple sliding mode fuzzy Control

从图 1 和图 2 可以看出, 所设计的多滑模自适应模糊控制器与传统 PID 控制算法相比, 实际航向角 γ (实线) 能够比较快速跟踪期望航向角 ψ_d (虚线), 具有较好的控制性能; 同时实际控制舵角 δ_e 光滑, 操舵合理.

为了防止参数漂移现象的发生, 针对模糊逻辑系统的参数自适应律引入非连续投影算法, 图 3 表明自适应参数收敛有界; 图 4 中参数 $\hat{\phi}$ 的变化曲线是收敛的, 正如定理中所证明的, 参数估计值是有界的.

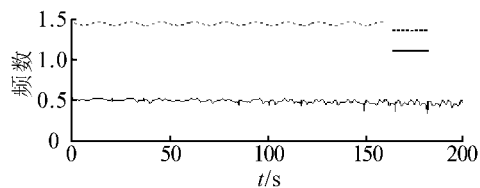


图3 模糊逻辑系统的自适应参数的变化曲线

Fig. 3 The curve of adaptive parameters of fuzzy system

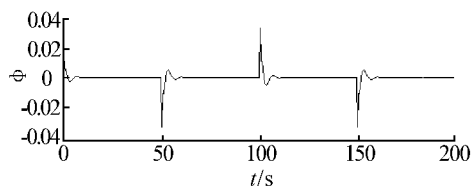
图4 参数 ϕ 的变化曲线

Fig. 4. The curve of parameter

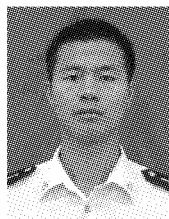
5 结束语

本文针对包含舵机特性的非匹配不确定船舶航向非线性系统数学模型,利用多滑模设计方法和模糊系统的逼近能力,提出了一种多滑模自适应模糊控制算法,该方法通过将非连续投影算法和积分型李雅普诺夫设计技术集成起来,避免了系统的参数漂移和控制器奇异现象的出现.该方法设计简单,并且消除了传统反演法在虚拟控制量求导过程中导致了系统方程微分项的膨胀问题,确保了船舶运动航向控制系统中,所有状态有界,且跟踪误差收敛到零.仿真结果表明,较之传统PID控制算法,所提算法具有较好的控制性能.

参考文献:

- [1] CHENG Jin, YI Jiangqiang, ZHAO Dongbin. Design of a sliding mode controller for trajectory problem of marine vessels[J]. IET Control Theory and Applications, 2007, 1(1): 118-121.
- [2] 杨盐生. 船舶航向非线性系统的输出反馈鲁棒控制[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1): 118-121.
- [3] 张松涛, 任光. 基于反馈线性化的船舶航向保持模糊自适应控制[J]. 交通运输工程学报, 2005, (5): 72-76.
- [4] 杜佳璐, 郭晨, 张显库. 船舶运动航向自适应非线性控制的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1445-1448.
- [5] 陈刚, 孙跃. 非匹配非线性系统多滑模模糊控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4182-4185.
- [6] LIN F J, SHEN P H, HSU S P. Adaptive back-stepping sliding mode control for linear induction motor [J]. IEEE Proceeding Electric Power Application, 2002, 14(9): 184-194.
- [7] CHENG G, WANG S. Robust and adaptive back-stepping control for nonlinear systems using fuzzy logic systems [J]. Lecture Notes in Artificial intelligence, 2005, 3614: 452-461.
- [8] YAO B. High performance adaptive robust control of nonlinear systems: a general framework and new schemes [C]// IEEE Proc 36th Conf Decision Contr. San Diego, 1997: 2489-2494.

作者简介:



袁雷,男,1985年生,研究生,主要从事船舶运动非线性控制与仿真研究,发表学术论文3篇。



吴汉松,男,1954年生,教授,主要从事非线性系统的变结构控制,智能控制以及最优控制的研究,近几年来,发表学术论文40余篇。