

船舶航向控制的多滑模鲁棒自适应设计

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: 针对带有未知虚拟控制增益和常参数不确定的非匹配不确定船舶航向非线性控制问题, 设计了一种新的多滑模鲁棒自适应控制算法. 该算法利用神经网络来逼近系统模型的不确定性; 应用逐步递推的多滑模控制算法降低了控制器的复杂性; 尤其是采用Nussbaum函数处理系统中符号未知的问题, 避免了可能存在的控制器奇异值问题; 然后借助Lyapunov稳定性分析方法, 理论分析证明了所得闭环系统全局一致最终有界, 且跟踪误差收敛到零. 仿真试验结果表明, 该方法具有较好的控制效果.

关键词: 船舶操纵; 参数不确定性; 滑模变结构控制; 神经网络; 自适应

中图分类号: TP273, U664 **文献标识码:** A

Multiple-sliding-mode robust adaptive design for ship course tracking control

YUAN Lei, WU Han-song

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

Abstract: A new multiple-sliding-mode robust adaptive control algorithm is proposed for a nonlinear mismatched uncertain ship steering model with unknown virtual control coefficients and constant parameter uncertainty. By employing the radial based function neural network to approximate nonlinear uncertain system functions, and by combining the multiple-sliding-mode control with recursive technique and Nussbaum gain approach, the algorithm not only simplifies the complexity of the controller and eliminates the need of the a priori knowledge of the sign in the control gain, but also overcomes the possible controller singularity problem. Based on the Lyapunov function, the stability analysis shows that all closed-loop signals are global uniformly ultimately bounded with the tracking error converging to zero. Finally, simulation results are presented to show that the proposed method is more effective than existing methods.

Key words: ship maneuvering; parameter uncertainty; sliding mode variable structure control; neural network; adaptive

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^[1], 如果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及其符号未知. 因此, 常规的PID控制算法往往达不到设计要求. 虽然递推算法(Backstepping)^[2,3]可以在一定程度上解决该问题, 但从一定意义上来说, 该方法的各虚拟控制量之间是相互耦合的, 这样给系统的分析带来了一定的困难. 多滑模控制算法^[4,5]是一种基于类似Backstepping的逐步递推方法, 它的提出解决了系统非匹配的问题, 并提高了滑模控制的品质特性.

本文在考虑船舶舵机伺服机构特性和船舶参数

不确定以及控制方向未知的情况下, 提出了应用于船舶航向控制的多滑模自适应神经网络控制算法, 从而解决了非匹配不确定船舶航向非线性控制系统的虚拟控制系数及符号未知的问题, 不仅避免了文献[2]中参数的重复估计, 而且还消除了控制器设计过程中可能存在的奇异值现象. 计算机仿真表明, 该算法行之有效, 控制效果良好.

2 系统描述和问题提出(Model description and problem formulation)

在自动舵的设计中, 船舶操纵系统模型通常采用采用线性Nomoto方程^[6]. 但是Nomoto方程是在小舵角和低频舵动的情况下推导出来的, 具有较大的局

限性, 而非线性模型又非常复杂. 为了改善模型的描述精度, 本文选取Norrbin模型来描述船舶操纵非线性运动:

$$T\dot{r} + r + \alpha r^3 = k\delta, \quad (1)$$

其中: $r = \dot{\psi}$ 为首摇角速度, ψ 为航向角, δ 为舵角, T 为时间常数, k 为增益, α 为Norrbin系数, 其值可由螺旋试验确定. 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 均未知常数.

考虑舵机伺服系统特性方程^[7]:

$$T_E\dot{\delta} + \delta = K_E\delta_E, \quad (2)$$

其中: 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 $x_1 = \psi, x_2 = r, x_3 = \delta, u = \delta_E$, 由式(1)和(2)可得到包含舵机特性的船舶操纵运动数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x) + bx_3, \\ \dot{x}_3 = -\frac{1}{T_E}x_3 + \frac{K_E}{T_E}u, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $f(x) = -\frac{1}{T}x_2 - \frac{\alpha}{T}x_3^2$ 为未知的非线性数. $b = K/T$ 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. 在式(1)中, 对于直线运动稳定性的船舶来说, $T > 0$; 而不具有直线运动稳定性的船舶, $T < 0$; 本文假定不确定的虚拟控制系数 b 符号未知.

从式(3)中看出, 本文的控制目标: 设计航向控制器使输出 $y = x_1$ 航向能够稳定快速地沿设定航向 ψ_d 航行, 同时保证闭环系统所有信号有界.

为了处理控制增益符号未知的问题, 本文引入Nussbaum函数^[8].

定义 1 连续函数 $N(s) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 被称为一个Nussbaum函数, 如果它满足以下条件:

$$\begin{cases} \limsup_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{s} \int_0^s N(\kappa) d\kappa = \infty, \\ \liminf_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{s} \int_0^s N(\kappa) d\kappa = -\infty. \end{cases} \quad (4)$$

本文所采用的就是一个Nussbaum函数, 如 $N(\kappa) = \kappa^2 \cos \kappa$.

引理 1^[9] 设 $V(t), \kappa(t)$ 为定义在 $[0, t_f]$ 上的光滑函数, 其中 $V(t) \geq 0, \forall t \in [0, t_f]$, 并且 $N(\kappa)$ 为一光滑Nussbaum函数. 如果下面不等式成立:

$$V(t) \leq c_0 + \int_0^t (gN(\kappa) + 1) \dot{\kappa} d\tau, \forall t \in [0, t_f], \quad (5)$$

其中: g 为非零常数, c_0 表示某一适当的常数, 则 $V(t), \kappa(t)$ 和 $\int_0^t (gN(\kappa) + 1) \dot{\kappa} d\tau$ 在 $[0, t_f]$ 上必有界; 且如果闭环解有界, 则 $t_f = \infty$.

本文采用RBF神经网络来逼近系统状态方程中的未知函数. 对一个非线性光滑函数 $f(x)$, 由神经网络的万能逼近定理可知

$$f(x) = W^T \phi(x) + \varepsilon, \quad (6)$$

其中: $x \in \Omega \subset \mathbb{R}^n$ 为输入矢量, $W = [w_1 \cdots w_m]^T \in \mathbb{R}^m$ 为权重矢量, ε 表示逼近误差, $m > 1$ 表示神经网络节点数, $\phi(x) = [\phi_1(x) \cdots \phi_m(x)]^T$, $\phi_j(x)$ 表示高斯函数:

$$\phi_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \cdots, m, \quad (7)$$

其中: b_j 为高斯函数宽度, 网络第 j 个节点的中心矢量为 $c_j = [c_{j1} \ c_{j2} \ \cdots \ c_{jm}]$.

3 多滑模鲁棒自适应控制器设计(The design of multiple sliding mode robust adaptive controller)

在控制器的设计过程中, 定义3个滑模面^[5]: $z_i = x_i - \psi_{di}; i = 1, 2, 3$, 这里 ψ_{di} 表示状态变量的期望值, 其中 $\psi_{d1} = \psi_d$. 其设计步骤如下:

Step 1 对第1个滑模面: $z_1 = x_1 - \psi_d$ 沿系统式(3)求导, 并考虑第2个滑模面 $z_2 = x_2 - \dot{\psi}_d$, 可得

$$\dot{z}_1 = x_2 - \dot{\psi}_d = z_2 + \psi_{d2}. \quad (8)$$

为了使式(8)镇定, 设计 ψ_{d2} 为

$$\psi_{d2} = -c_1 z_1, \quad (9)$$

其中 $c_1 > 0$ 为设计常数.

构造Lyapunov函数:

$$V_1 = z_1^2/2, \quad (10)$$

对 V_1 求导, 并考虑式(8)和(9)可得

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2. \quad (11)$$

Step 2 对第2个滑模面沿系统式(3)求导, 可得

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \ddot{\psi}_d = f(x) + bx_3 - \ddot{\psi}_d, \quad (12)$$

由于 $f(x)$ 是未知的非线性函数, 利用神经网络的逼近特性, 并考虑 $z_3 = x_3 - \psi_{d3}$ 可得

$$\dot{z}_2 = W_1^T \phi(x) + \varepsilon_1 + bz_3 + b\psi_{d3} - \ddot{\psi}_d, \quad (13)$$

由于 b 的符号是未知的, 设计 ψ_{d3} 及参数的自适应律为

$$\psi_{d3} = N(\kappa)\tau, \quad (14)$$

$$\dot{\kappa} = z_2\tau, \quad (15)$$

其中 $\tau = \hat{W}_1^T \phi(x) + c_2 z_2 - \dot{\psi}_{d2} + k_1 \operatorname{sgn} z_2$.

$$\dot{\hat{W}}_1 = r_1 \phi(x) z_2, \quad (16)$$

这里: $\dot{\psi}_{d2} = -c_1 z_2 + c_1^2 z_1$. $r_1, k_1, c_2 > 0$ 为设计常数; $N(\kappa)$ 是一偶的光滑Nussbaum函数; $\hat{W}_1$ 是 W_1 的估计值.

构造Lyapunov函数 V_2 :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2r_1} \tilde{W}_1^T \tilde{W}_1, \quad (17)$$

其中 $\tilde{W}_1 = W_1 - \hat{W}_1$, $r_1 > 0$ 为设计常数.

对 V_2 求导, 并将式(13)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 - \frac{1}{r_1} \tilde{W}_1^T \dot{\hat{W}}_1 = \\ &= \dot{V}_1 + z_2 [(\hat{W}_1 + \tilde{W}_1)^T \phi(x) + \varepsilon_1 + \\ &+ bz_3 + b\psi_{d3} - \dot{\psi}_{d2}] - \frac{1}{r_1} \tilde{W}_1^T \dot{\hat{W}}_1 = \\ &= \dot{V}_1 + z_2 (\hat{W}_1^T \phi(x) + bz_3 - \dot{\psi}_{d2}) + \\ &+ \varepsilon_1 z_2 + bz_2 z_3 + \frac{1}{r_1} \tilde{W}_1^T (r_1 \phi(x) z_2 - \dot{\hat{W}}_1). \end{aligned} \quad (18)$$

将式(14)~(16)代入式(18)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 bN(\kappa)\tau + z_2 \tau - c_2 z_2^2 + \\ &+ bz_2 z_3 + \varepsilon_1 z_2 - k_1 |z_2| = \\ &= \dot{V}_1 + (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa} - c_2 z_2^2 + \\ &+ bz_2 z_3 + \varepsilon_1 z_2 - k_1 |z_2| \leq \\ &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_1 z_2 + bz_2 z_3 + \\ &+ (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa} - (k_1 - |\varepsilon_1|) |z_2|. \end{aligned} \quad (19)$$

假设参数满足 $|\varepsilon_1| \leq k_1$, 则式(19)变为

$$\dot{V}_2 \leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_1 z_2 + bz_2 z_3 + (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa}. \quad (20)$$

Step 3 对第3个滑模面, 即 $z_3 = x_3 - \psi_{d3}$ 沿系统式(3)求导, 并考虑式(14)可得

$$\dot{z}_3 = -\frac{1}{T_E} x_3 + \frac{K_E}{T_E} u - \dot{N}(\kappa)\tau - N(\kappa)\dot{\tau}, \quad (21)$$

由于 $\dot{\tau}$ 是很难计算得到, 可以采用一个神经网络来逼近如下的非线性函数:

$$-N(\kappa)\dot{\tau} = W_2^T \phi(x) + \varepsilon_2, \quad (22)$$

设计实际的控制律及参数的自适应律为:

$$u = \frac{T_E}{K_E} (-c_3 z_3 + \frac{1}{T_E} x_3 + \dot{N}(\kappa)\tau - \hat{W}_2^T \phi(x) - k_2 \operatorname{sgn} z_3), \quad (23)$$

$$\dot{\hat{W}}_2 = r_2 \phi(x) z_3, \quad (24)$$

这里: $\dot{N}(\kappa) = 2\kappa \cos \kappa - \kappa^2 \sin \kappa$, $c_3, r_2, k_2 > 0$. 为设计常数; $\hat{W}_2$ 是 W_2 的估计值.

构造全局Lyapunov函数 V

$$V = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2r_2} \tilde{W}_2^T \tilde{W}_2 + \frac{|b|}{2\rho} \tilde{\theta}^2, \quad (25)$$

其中: $\tilde{W}_2 = W_2 - \hat{W}_2$; $r_2, \rho > 0$ 为设计常数, $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$; $\hat{\theta}$ 为 $\theta = 1/b$ 的估计值, 此设计中无须对 b 直接估计, 而是引入参数 $\theta = 1/b$, θ 的引入可以避免在设计过程中出现的奇异值现象.

对 V 求导, 并将式(21)和式(22)代入可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 - \frac{1}{r_2} \tilde{W}_2^T \dot{\hat{W}}_2 - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} = \\ &= \dot{V}_2 + z_3 (-\frac{1}{T_E} x_3 + \frac{K_E}{T_E} u - \dot{N}(\kappa)\tau + \\ &+ W_2^T \phi(x) + \varepsilon_2) - \frac{1}{r_2} \tilde{W}_2^T \dot{\hat{W}}_2 - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} = \\ &= \dot{V}_2 + z_3 (-\frac{1}{T_E} x_3 + \frac{K_E}{T_E} u - \dot{N}(\kappa)\tau + \hat{W}_2^T \phi(x)) + \\ &+ \frac{1}{r_2} \tilde{W}_2^T (r_2 \phi(x) z_3 - \dot{\hat{W}}_2) - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} + \varepsilon_2 z_3. \end{aligned} \quad (26)$$

将式(23)和(24)代入式(26)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 - c_3 z_3^2 + \varepsilon_2 z_3 - k_2 |z_3| - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} \leq \\ &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa} + z_1 z_2 + \\ &+ bz_2 z_3 - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} + |\varepsilon_2| |z_3| - k_2 |z_3| = \\ &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + \\ &+ (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa} - (k_2 - |\varepsilon_2|) |z_3| + \omega, \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $\omega = z_2(z_1 + \hat{b}z_3) - \frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} - (\frac{1}{\hat{\theta}} - \frac{1}{\theta}) z_2 z_3$.

设计 $z_3 = -\hat{\theta} z_1$, 且参数 $\hat{\theta}$ 的自适应律设计为

$$\dot{\hat{\theta}} = -\rho \operatorname{sgn} b z_1 z_2, \quad (28)$$

其中 $\rho > 0$ 为设计常数.

将 $z_3 = -\hat{\theta} z_1$ 代入 ω 中可得

$$\begin{aligned} \omega &= -\frac{|b|}{\rho} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} - (\frac{1}{\hat{\theta}} - \frac{1}{\theta}) \hat{\theta} z_1 z_2 = \\ &= -\rho^{-1} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}}^{-1} (|\theta|^{-1} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} + \rho z_1 z_2), \end{aligned} \quad (29)$$

由 $\theta |\theta|^{-1} = \operatorname{sgn} \theta = \operatorname{sgn} b$, 式(29)可变为

$$\omega = -\rho^{-1} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}}^{-1} (\operatorname{sgn} b \dot{\hat{\theta}} + \rho z_1 z_2), \quad (30)$$

将式(28)代入式(30)并考虑式(27)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + \\ &+ (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa} - (k_2 - |\varepsilon_2|) |z_2|. \end{aligned} \quad (31)$$

假设参数满足 $|\varepsilon_2| \leq k_2$, 则式(31)变为:

$$\dot{V} \leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + (bN(\kappa) + 1)\dot{\kappa}, \quad (32)$$

对式(32)进行积分并应用引理可知, 在 $[0, t_f]$ 上, $V(t), \kappa(t), \int_0^t (bN(\kappa(\tau)) + 1)\dot{\kappa}(\tau)d\tau$ 是全局一致最终有界. 根据设计过程, $z_1(t), z_2(t), z_3(t), \hat{W}_1(t), \hat{W}_2(t), N(\kappa)$ 及原状态 x_1, x_2, x_3 也都是全局一致有界. 因此, 有限时间逃逸现象没有发生, 则 $t_f = \infty$. 根据Barbalat引理^[10], 可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} z_2(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} z_3(t) = 0$, 由 $z_1 = x_1 - \psi_d$ 可知 $x_1 \rightarrow \psi_d$. 因此, 本文所设计的控制器能够使船舶沿设定航向航行. 上述设计总结为以下定理:

定理 1 针对船舶航向虚拟控制系数未知的非匹配不确定非线性系统(3), 假设参数在满足 $|\varepsilon_1| \leq k_1, |\varepsilon_2| \leq k_2$ 的情况下, 在控制律式(23)以及参数自适应律(16)(24)和式(28)的作用下, 闭环系统的所有信号均全局一致最终有界, 且跟踪误差收敛到零.

4 仿真研究(Simulation studies)

在仿真中采用大连海事大学远洋实习船“育龙”轮实船数据参数^[2]. 假设系统的初始状态为:

$$x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0, \kappa(0) = 0.55\pi.$$

在仿真中选取设计参数为:

$$c_1 = 0.5, c_2 = 15, c_3 = 0.1, k_1 = k_2 = 0.1.$$

假设设定航向 $\psi_d = 10^\circ$, 利用本文提出的控制算法进行仿真, 仿真结果如图1、图2和图3所示. 其中下标1, 2, 3分别表示是本文控制算法; 未加神经网络补偿的算法; 常规PID控制算法. 从图1~图3可以看出, 未加神经网络补偿的控制器具有较大抖振问题, 对船舶自动舵的磨损较大, 这在实际应用中是绝对不允许的. 并且与常规PID控制算法相比, 本文所设计的控制器能够使船舶航向非线性控制系统具有较好的控制能力, 且控制舵角光滑且操舵合理, 具有一定的应用价值.

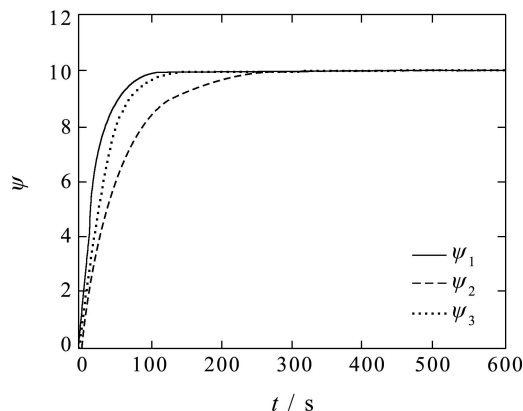


图1 航向角 ψ 变化曲线

Fig. 1 The curve of heading angle ψ

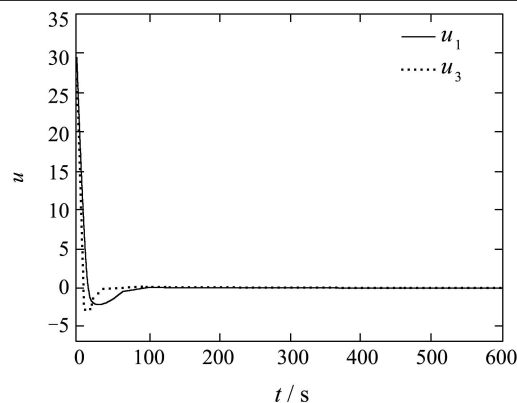


图2 控制舵角 u_1, u_3 变化曲线

Fig. 2 The curve of rudder angle u_1, u_3

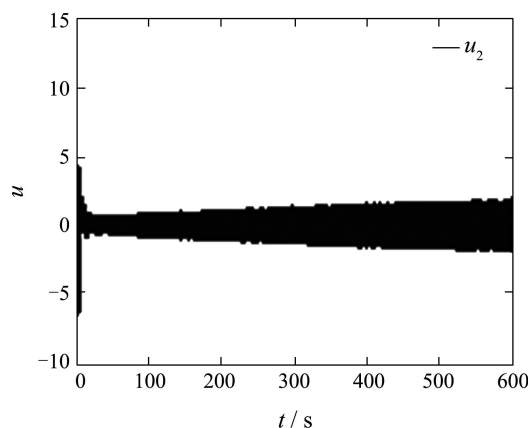


图3 控制舵角 u_2 变化曲线

Fig. 3 The curve of rudder angle u_2

5 结论(Conclusion)

本文首先建立了包含舵机伺服机构特性的非匹配不确定船舶航向非线性系统模型; 在船舶航向控制器的设计中, 为了消除虚拟控制增益符号未知的影响, 引入了Nussbaum函数; 并利用RBF神经网络逼近能力来逼近模型中的未知非线性函数, 提出一种新的多滑模自适应神经网络控制算法. 理论分析与仿真研究表明, 所设计的控制器能够快速准确地跟踪设定航向, 显示了较好的控制性能.

参考文献(References):

- [1] 罗伟林, 邹早建, 李铁山. 船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 893 – 895.
(LUO Weilin, ZOU Zaojian, LI Tieshan. Robust tracking control of nonlinear ship steering[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 893 – 895.)
- [2] 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, 7(6), 1445 – 1448.
(DU Jialu, GUO Chen, ZHAN Xianku. Simulation studies on adaptive nonlinear control of ship motion course[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(6): 1445 – 1448.)
- [3] 刘雨, 郭晨, 等. 基于backstepping的船舶航向滑模控制[J]. 中南大学学报, 2007, 38(1): 278 – 282.

- (LIU Yu, GUO Chen, et al. Sliding-mode control of ship course tracking based on backstepping[J]. *Journal of Center South University (Science and Technology)*, 2007, 38(1): 278 – 282.)
- [4] HEDRICK J K, YIP P P. Multiple sliding control: theory and application[J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2000, 122: 586 – 593.
- [5] 管成, 朱善安. 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 931 – 938.
(GUAN Cheng, ZHU Shan'an. Multiple sliding mode robust adaptive control of an electro-hydraulic servo system[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 931 – 938.)
- [6] NOMOTO K. On the steering quality of ships[J]. *International Shipbuilding Progress*, 1957, 35(1): 354 – 370.
- [7] LIN F J, SHEN P H, HSU S P. Adaptive backstepping sliding mode control for linear induction motor[J]. *IEEE Proceeding Electric Power Application*, 2002, 14(9): 184 – 194.
- [8] NUSSBAUM D. Some remarks on the conjecture in parameter adaptive control[J]. *Systems & Control Letters*, 1983, 3(3): 243 – 246.
- [9] YE X D, JIANG J P. Adaptive nonlinear design without a priori knowledge of control directions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1617 – 1621.
- [10] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(1): 146 – 155.

作者简介:

- 袁 雷** (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船舶运动非线性控制研究与仿真, E-mail: yuanl886@163.com;
- 吴汉松** (1954—), 男, 教授, 主要研究方向为非线性系统控制理论与应用, E-mail: wuhs2002@163.com.

(上接第1617页)

- [4] 张鸿燕, 耿征. Levenberg-Marquardt算法的一种新解释[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 5 – 8.
(ZHANG Hongyan, GENG Zheng. Novel interpretation for levenberg-marquardt algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(19): 5 – 8.)
- [5] ZHAO L H, LI H, LIU W N, et al. The simulation analysis of influence on jointless track circuit signal transmission from compensation capacitor based on transmission-line theory[C] // *The Third IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation And EMC Technologies For Wireless Communications*. Beijing: IEEE, 2009: 1137 – 1142.
- [6] 赵怀东. ZPW-2000A型自动闭塞设备安装与维护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
(ZHAO Huaidong. *Installation and Maintenance of Automatic Block Equipment of ZPW-TYPE-2000A*[M]. Beijing: China Railway Press, 2005.)
- [7] 邱宽民. JT1-CZ2000型机车信号车载系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
(QIU Kuanmin. *JT1-CZ2000 Cab Signal on-Board System*[M]. Beijing: China Railway Press, 2007.)

作者简介:

- 赵林海** (1971—), 男, 副教授, 研究方向为高速铁路列车运行控制与故障诊断, E-mail: zhaolh@bjtu.edu.cn;
- 许俊杰** (1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为模式识别技术在铁路信号控制中的应用, E-mail: 09120368@bjtu.edu.cn;
- 刘伟宁** (1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为模式识别技术在铁路信号控制中的应用, E-mail: 08120392@bjtu.edu.cn;
- 蔡伯根** (1966—), 男, 教授, 研究方向为智能交通控制技术, E-mail: bgcai@bjtu.edu.cn.