

文章编号: 1001-0920(2006)07-0829-04

单值预估离散滑模控制及其应用

宋立忠, 李槐树, 杨志红, 周 岗
(海军工程大学 电气与信息工程学院, 武汉 430033)

摘 要: 提出基于单值预估离散滑模控制算法的离散变结构控制系统设计新思路. 根据不确定系统的名义模型设计理想滑模面, 以名义模型作为预测模型, 利用当前及过去时刻的滑模信息预测未来时刻的滑模动态, 并将滚动优化和反馈校正引入离散滑模控制系统的设计. 该方法不仅较好地消除了抖振现象, 而且能保证闭环系统的鲁棒稳定性. 将该算法应用于船舶航向控制器的设计, 试验结果表明了它的有效性.

关键词: 离散时间系统; 变结构控制; 滑模预测; 船舶自动舵

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Discrete-time Sliding Mode Predictive Control Algorithm and Its Application

SONGLi-zhong, LIHuai-shu, YANGZhi-hong, ZHOUGang

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China
Correspondent: SONGLi-zhong, E-mail: lizhongsong@sina.com)

Abstract: An approach to the variable structure control design for uncertain discrete-time systems based on the sliding mode single-value prediction algorithm is proposed. A nominal model is used to determine the ideal sliding surface and predict future sliding mode value. The receding optimization and the feedback correction are introduced into the design method. Chattering phenomena is avoided and robust stability of the closed-loop system is ensured. The proposed algorithm is applied to a ship autopilot controller design and the experiment results show its effectiveness.

Key words: Discrete time systems; Variable structure control; Sliding mode prediction; Ship autopilot

1 引 言

变结构控制(滑模控制)以其鲁棒性强的特点而受到控制界的关注. 近年来, 适用于计算机控制系统的离散变结构控制已成为研究的热点. 文献[1]系统地给出了离散滑动模态的定义, 并采用离散趋近律作为到达条件进行控制器设计. 该方法能刻画趋近过程的品质, 与采用不等式形式到达条件的方法相比, 具有控制求取简单的优点, 因此很快成为离散变结构控制设计的一种主要方法. 但是离散趋近律存在稳态抖振的缺点, 若采用不确定性的上界设计控制器, 以保证闭环系统的鲁棒稳定性, 则将导致变结构控制过于保守, 加剧了抖振. 为此, 学者们提出多

种新的离散趋近律^[2-5], 并发展了多种具有自适应特点的扰动补偿算法^[3-6], 使得基于趋近律方法的离散变结构控制理论日益完善.

文献[7]从新的角度探索解决方案, 提出了基于滑模预测的离散变结构控制设计方法. 该方法以期望的滑模动态轨迹作为参考轨迹, 以不确定系统的名义模型作为预测模型, 利用当前及过去时刻的滑模信息预测未来时刻不确定因素对系统的影响, 从而实现滚动优化求解, 对滑模控制进行实时校正. 它既避免了传统离散变结构控制存在的抖振现象, 又使闭环控制系统具有很强的鲁棒性.

本文对滑模预测离散变结构控制作进一步研

收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2005-06-06

作者简介: 宋立忠(1969—), 男, 山东章丘人, 讲师, 博士, 从事变结构控制、控制工程的研究; 李槐树(1965—), 男, 江苏连云港人, 副教授, 博士, 从事控制理论、电机控制等研究.

究,提出一种单值预估离散滑模控制算法,既保留了文献[7]方法的优点,又使控制算法大大简化。将本文算法应用于船舶航向自动舵的设计,实验结果表明了它的有效性。

2 单值预估滑模控制算法

2.1 理想滑模面设计

考虑如下多输入不确定离散时间系统:

$$x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) + w(k). \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, u \in R^m, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, \Delta A$ 和 ΔB 表示参数不确定性, $w \in R^n$ 表示外部干扰。对于多输入变结构控制系统,滑模面共有 m 个,即

$$s_j: s_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, m.$$

定义线性滑模函数

$$s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_m(k)]^T = [C_1, C_2, \dots, C_m]^T x(k) = Cx(k), \quad (2)$$

其中 $C \in R^{m \times n}$ 。则理想滑动模态满足下列系统的运动方程:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ Cx(k) = O^{m \times 1}. \end{cases} \quad (3)$$

作线性变换 $Z(k) = Tx(k)$, 使得 $TB = [O^{(n-m) \times m}, B_2]^T, B_2 \in R^{m \times m}$ 非奇异。对各变量进行相应分解,则系统(3)可改写为

$$Z_1(k+1) = A_{11}Z_1(k) + A_{12}Z_2(k), \quad (4)$$

$$Z_2(k+1) = A_{21}Z_1(k) + A_{22}Z_2(k) + B_2u(k), \quad (5)$$

$$s(k) = C_{z1}Z_1(k) + C_{z2}Z_2(k) = O^{m \times 1}. \quad (6)$$

其中

$$Z = [Z_1, Z_2]^T, Z_1 \in R^{n-m}, Z_2 \in R^m,$$

$$CT^{-1} = [C_{z1}, C_{z2}], TA T^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix},$$

$$A_{11} \in R^{(n-m) \times (n-m)}, A_{22} \in R^{m \times m}.$$

O 代表零矩阵,其上标表示维数。假设 CB 非奇异,则 C_{z2} 非奇。由式(6)可得

$$Z_2(k) = -C_{z2}^{-1}C_{z1}Z_1(k). \quad (7)$$

代入式(4)可得理想滑动模态的运动方程

$$Z_1(k+1) = (A_{11} - A_{12}C_{z2}^{-1}C_{z1})Z_1(k). \quad (8)$$

根据极点配置定理,可知存在矩阵 K ,使滑动模态具有任意的极点且 $K = -C_{z2}^{-1}C_{z1}$ 。于是可得切换函数系数矩阵

$$C = [C_{z1}, C_{z2}]^T = [-C_{z2}K, C_{z2}]^T = C_{z2}[-K, I]^T. \quad (9)$$

其中: $I \in R^{m \times m}$ 为单位阵, C_{z2} 为非奇的未定参数阵。为了简便起见,可取 $C_{z2} = I$ 。 C 值一旦确定,理想滑模运动的稳定性和动态品质也就确定

2.2 控制律设计

将预测控制引入滑模控制系统,可得到滑模预测控制算法^[7]。但若采用多步预测,则需根据多个滑模预测值来计算当前的控制量,并要正确选择预测时域长度、控制时域长度以及最优指标中的加权系数矩阵,这使控制的计算较为繁琐。预测控制理论的研究表明,对于被控过程的每一输出,只选择未来某一时刻的预测值计算最优控制律,其相应的控制步数只取一步,可获得与多步预测控制相同的调节性能。基于这一思想,可得到一种简单实用的单值预估滑模控制算法。

以不确定离散时间系统(1)的名义模型作为预测模型,则未来 p 采样时刻的滑模函数预测值为

$$s_y(k+p) = CA^p x(k) + \sum_{i=1}^p CA^{i-1} B u(k+p-i). \quad (10)$$

在每个采样时刻,用实测滑模函数值 $s(k)$ 对预估值进行修正,可得

$$\begin{aligned} \hat{s}_y(k+p) &= s_y(k+p) + H_p [s(k) - s_y(k|k-p)] = \\ & CA^p x(k) + \sum_{i=1}^p CA^{i-1} B u(k+p-i) + \\ & H_p [s(k) - s_y(k|k-p)] \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $H_p \in R^{m \times m}$ 为系数对角阵; $s_y(k|k-p)$ 为相同预测长度情况下,由名义模型估计的当前时刻的滑模函数值,可表示为

$$s_y(k|k-p) = CA^p x(k-p) + \sum_{i=1}^p CA^{i-1} B u(k-i). \quad (12)$$

对于单值预估控制^[8],只在 k 时刻改变控制作用的大小,其后控制作用维持不变,即 $u(k+i) = u(k)$, $i > 0$ 。使反馈修正后的滑模预测值等于给定值,则有

$$\begin{aligned} s_r(k+p) &= \hat{s}_y(k+p) = \\ & CA^p x(k) + \sum_{i=1}^p CA^{i-1} B u(k) + \\ & H_p [s(k) - s_y(k|k-p)], \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $s_r(k+p)$ 为由滑模参考轨迹确定的给定值。一般取 H_p 为单位对角阵,则可直接根据式(13)解出单值预估滑模控制律

$$u(k) = \left(\sum_{i=1}^p CA^{i-1} B \right)^{-1} [s_r(k+p) - CA^p x(k) - s(k) + s_y(k|k-p)] \quad (14)$$

可见,单值预估滑模控制律的求解相当简单。当 $p = 1$ 时,式(14)可进一步简化为

$$u(k) = (CB)^{-1} [s_r(k+1) - CAx(k) -$$

$$s(k) + s_y(k | k - 1) \} \quad (15)$$

2.3 稳定性分析

定理 1 对于不确定系统(1), 采用单值预估滑模控制律(15), 只要不确定部分的变化率范数有界, 则闭环系统鲁棒稳定

证明 定义系统不确定性等效项

$$d(k) = \Delta A x(k) + \Delta B u(k) + w(k). \quad (16)$$

式(15)代入系统(1), 可得闭环系统运动方程

$$\begin{aligned} x(k+1) = & \\ & A x(k) + B (CB)^{-1} [s_r(k+1) - \\ & CA x(k) - s(k) + s_y(k | k - 1)] + d(k). \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)代入式(2), 可得闭环系统实际滑模动态方程

$$\begin{aligned} s(k+1) = Cx(k+1) = & \\ s_r(k+1) - s(k) + s_y(k | k - 1) + Cd(k). \end{aligned} \quad (18)$$

由式(12)可得

$$s_y(k | k - 1) = CA x(k - 1) + CB u(k - 1), \quad (19)$$

$$\begin{aligned} s(k) = Cx(k) = & \\ CA x(k - 1) + CB u(k - 1) + Cd(k - 1). \end{aligned} \quad (20)$$

于是式(18)可进一步描述为

$$\begin{aligned} s(k+1) = & \\ s_r(k+1) + Cd(k) - Cd(k - 1). \end{aligned} \quad (21)$$

由于 $s_r(k+1)$ 为滑模参考轨迹, 可以人为地选择使之满足到达条件^[1], 在有限步内收敛到理想滑模面 $s_j = 0, j = 1, 2, \dots, m$. 因此, 只要等效干扰的变化率有界, 即满足

$$Cd(k) - Cd(k - 1) \leq m, \quad (22)$$

式中 m 为一正数, 则必然存在某一时刻 k_0 , 使得当 $k > k_0$ 时, $s(k+1) \leq m$ 恒成立. 这说明当存在不确定性时, 系统的任意运动必然到达并稳定于以理想滑模面为中心, 以 $\pm m$ 为边界的切换带内, 因此闭环系统鲁棒稳定

定理 1 表明, 当预测长度 $p = 1$ 时闭环系统是鲁棒稳定的. 当 $p > 1$ 时, 采用滑模单值预估控制律(14), 则闭环系统滑模动态方程为

$$\begin{aligned} s(k+1) = & \\ CA x(k) + CB \left(\sum_{i=1}^p CA^{i-1} B \right)^{-1} [s_r(k+p) - & \\ CA^p x(k) - \sum_{i=1}^p CA^{i-1} d(k-i)] + Cd(k). \end{aligned} \quad (23)$$

显然, 系统稳定与否直接与预测长度有关, 而 p 值的确定比较困难, 在实际应用时一般可取 $p = 1$, 以保

证系统稳定性并简化设计过程, 减小计算量

2.4 滑模参考轨迹的选取

由控制律(14)或(15)可知, 滑模参考轨迹的选取直接决定了最终的控制形式. 滑模控制的任务在于保证系统任意运动均能在有限时间内到达并稳定于理想滑模面, 因此可直接选择理想滑模面方程作为参考轨迹

$$s_r(k+p) = O^{m \times 1}. \quad (24)$$

此时控制律(14)变为

$$\begin{aligned} u(k) = - \left(\sum_{i=1}^p CA^{i-1} B \right)^{-1} [CA^p x(k) + & \\ s(k) - s_y(k | k - p)] \end{aligned} \quad (25)$$

当取 $p = 1$ 时, 式(25)可进一步简化为

$$u(k) = - (CB)^{-1} [CA x(k) + s(k) - s_y(k | k - 1)] \quad (26)$$

由参考轨迹的选取可知, 控制律(25)相当于驱使系统任意偏离理想滑模面的运动, 都能在一步之内返回滑模面(名义系统)或滑模带(不确定系统)的控制力. 显然, 这样的趋近过程是最快的, 系统的动态响应也是最快的, 但也意味着所求得的控制量可能过大, 超过了实际系统执行机构的允许范围. 为解决此问题, 可采用工程上常用的限幅方法. 假设实际执行机构的最大允许控制量为 $\pm u_0$, 则实际加到执行机构的控制量 $\bar{u}(k)$ 可表示为

$$\bar{u}(k) = \begin{cases} u(k), & u(k) < u_0; \\ \frac{u(k)}{u_0} u_0, & u(k) > u_0 \end{cases} \quad (27)$$

3 船舶自动舵的应用实验

船舶航向控制表现为复杂的控制问题, 主要是由于船舶运动数学模型以及外界风、浪、流等干扰具有明显的不确定性. 探讨鲁棒性强的控制算法并应用于自动舵设计, 已成为船舶控制领域的一个研究热点^[9]. 变结构控制虽然基于模型, 但它对对象模型的精度要求很低, 只需建立简单的模型即可.

本文采用航向控制设计中最为常用的一阶 $K-T$ 方程 $T \dot{\psi} + \psi = K \delta$, 并考虑舵机特性方程 $T_E \dot{\delta} + \delta = K_E \delta_E$. 则航-舵系统数学模型可表示为如下状态方程:

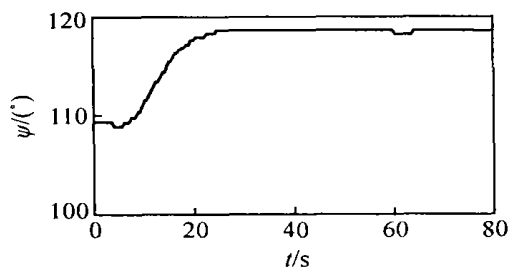
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/T & -K/T \\ 0 & 0 & -1/T_E \end{bmatrix} x + & \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_E/T_E \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/T \\ 0 \end{bmatrix} \omega \end{aligned} \quad (28)$$

其中: $x_1 = \psi_d - \psi$, ψ_d 和 ψ 分别表示设定航向角和实际航向角, $x_2 = \dot{x}_1$ 表示舵摇角速度, $x_3 = \delta$ 为实际舵

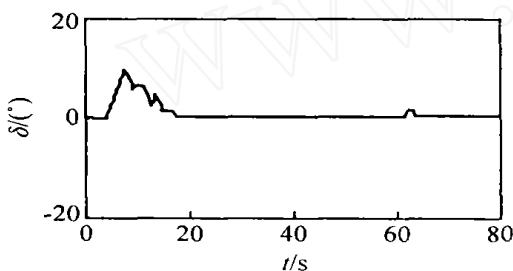
角, $u = \delta_e$ 为控制器给出的命令舵角; 其他参数为: $T = T_0 + \Delta T, K = K_0 + \Delta K, T_E = T_{E0} + \Delta T_E, K_E = K_{E0} + \Delta K_E$. 下标 0 表示名义模型, 符号 Δ 表示参数不确定性, ω 表示外部风浪干扰

K_0 和 T_0 可采用最小二乘法, 对船舶在有限速度操舵下采集的航向数据进行一阶方程拟合而得到. 将式(28)的离散化模型写成

$$x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) + Fw, \quad (29)$$

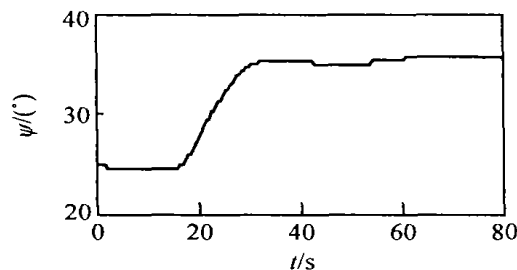


(a) 航向角曲线

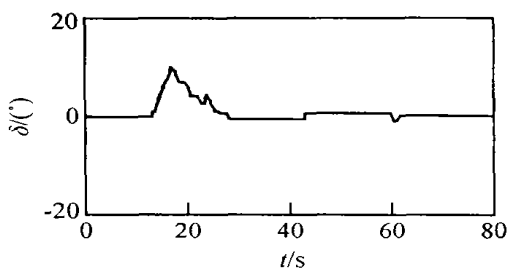


(b) 舵角曲线

图1 名义参数的实验结果



(a) 航向角曲线



(b) 舵角曲线

图2 改变船型参数的实验结果

则船舶自动舵的离散滑模(变结构)控制律可直接采用式(26)和(27).

在海军工程大学导航技术教研室研制的舰-舵模拟器上进行实验研究. 该模拟器采用数字模拟和物理模拟相结合的方法, 能逼真地模拟出在实船环境下的自动舵闭环控制系统. 船舶参数为: $T = 5.5, K = 0.5$. 改变航向 10° 的试验结果如图1所示. 可以看出, 所设计的控制器能快速、准确地跟踪并保持在新的航向上, 无抖振现象发生. 当改变船型参数并施加风干扰, 而控制器参数保持不变时, 实验结果如图2所示. 显然, 控制器仍然保持较好的控制效果, 体现了变结构控制鲁棒性强的特点.

4 结论

本文将预测控制引入离散变结构控制系统, 提出了单值预估离散滑模控制算法, 并将该算法应用于船舶航向自动舵的设计. 实验结果表明, 利用本文方法设计的控制器能快速准确地跟踪并保持在设定航向上, 无抖振现象发生. 本文的研究为离散时间系统的滑模(变结构)控制设计提供了一种简单易行的新方法.

参考文献(References)

- [1] Gao W B, Wang Y F, Homaifa A. Discrete-time Variable Structure Control System s[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1995, 42(2): 117-122
- [2] 姚琼荟, 宋立忠, 温洪. 离散变结构控制系统的比例-等速-变速控制[J]. *控制与决策*, 2000, 15(3): 329-332
(Yao Q H, Song L Z, Wen H. Proportional-constant-variable Rate Control for Discrete-time Variable Structure System s[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 329-332)
- [3] 李文林. 离散时间系统变结构控制的趋近律问题[J]. *控制与决策*, 2004, 19(11): 1267-1270
(Li W L. Reaching Law of Discrete-time Variable Structure Control System s[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(11): 1267-1230)
- [4] 翟长连, 吴智铭. 不确定离散时间系统的变结构控制设计[J]. *自动化学报*, 2000, 26(2): 184-191
(Zhai C L, Wu Z M. Variable Structure Control Design for Uncertain Discrete Time System s [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(2): 184-191)
- [5] 宋立忠, 陈少昌, 姚琼荟. 多输入不确定系统离散变结构控制设计[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 468-470
(Song L Z, Chen S C, Yao Q H. Discrete Variable Structure Control Design for Multi-input Uncertain System s[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 468-470)

(下转第 836 页)

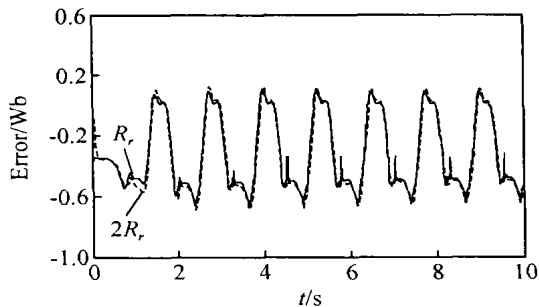


图3 β 轴磁链误差

6 结 论

本文从感应电机的数学模型入手,利用非线性反步法设计感应电机位置跟踪控制系统,并用多层前馈神经网络估计转子磁链,避免了实际中转子磁链测量带来的困难。通过李亚普诺夫稳定性定理,证明了所设计的位置控制器能保证系统的稳定性。仿真结果表明,系统能平稳运行,可获得较好的位置跟踪性能。

参考文献(References)

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
(Chen B S. *The Electric Power Drive Automatic Control System — Motion Control System* [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2004.)
- [2] Boukas T K, Habetler T G. High-performance Induction Motor Speed Control Using Exact Feedback Linearization with State and State Derivative Feedback[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2004, 19(4): 1022-1028.
- [3] Romeo Ortega, Antonio Loria, Per Johan Nicklasson,

- et al. *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems*[M]. New York: Springer, 1998.
- [4] 杨俊华, 吴捷, 胡跃明. 反步方法原理及在非线性和鲁棒控制中的应用[J]. *控制与决策*, 2002, 17(增): 641-653.
(Yang J H, Wu J, Hu Y M. Backstepping Method and Its Applications to Nonlinear Robust Control [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(S): 641-653.)
- [5] Moldoveanu F, Topa I, Comnac V, et al. Observer-based Rotor Flux Estimation for A synchronous Machines [A]. *OPTIM '98 Proc of the 6th Int Conf [C]* Brasov, 1998, 2: 505-510.
- [6] Weng H Q, Liu C W, Li F H, et al. A New Flux Observer of Induction Motor by H Optimization [A]. *IEEE Industry Applications Conf [C]* Chicago, 2001, 3: 1795-1799.
- [7] Tanomaru J. Comparative Study of Two Neural Network Approaches for Nonlinear Identification [A]. *Int Symp on Speech, Image Processing and Neural Networks [C]* Hong Kong, 1994, 2: 487-490.
- [8] Jiang D C, Wang J. On-line Learning of Dynamical Systems in the Presence of Model Mismatch and Disturbances [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2000, 11(6): 1272-1283.
- [9] Laxmidhar Behera, Swagat Kumar, Subhas Chandra Das. Identification of Nonlinear Dynamical Systems Using Recurrent Neural Networks [A]. *Conf on Convergent Technologies for Asia-pacific Region [C]* Taj Residency, 2003, 3: 1120 - 1124.
- [10] Ben Brahim L, Tadakuma S. Practical Considerations for Sensorless Induction Motor Drive System [A]. *IECON '98 Proc of the 24th Annual Conf [C]* Aachen, 1998: 1002-1007.

(上接第 832 页)

- [6] 于双和, 强文义, 傅佩琛. 无抖振离散准滑模控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(3): 380-382.
(Yu S H, Qiang W Y, Fu P C. Chattering-free Discrete Quasi-sliding Mode Controller [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 380-382.)
- [7] 宋立忠, 陈少昌, 姚琼荟. 滑模预测离散变结构控制[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(5): 826-829.
(Song L Z, Chen S C, Yao Q H. Discrete Variable Structure Control Algorithm Based on Sliding Mode Prediction [J]. *Control Theory and Applications*, 2004, 21(5): 826-829.)
- [8] 胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制系统的鲁棒稳定性[J]. *控制与决策*, 2001, 16(1): 126-128.
(Hu P H, Yuan P. Robustness of State Feedback Predictive Control Systems [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(1): 126-128.)
- [9] 杨益生, 贾欣乐, 于晓利. 船舶航向非线性系统的鲁棒自适应控制[J]. *中国造船*, 2000, 41(1): 21-25.
(Yang Y S, Jia X L, Yu X L. Robust Adaptive Control Algorithm Applied to Ship Steering Autopilot with Uncertain Nonlinear System [J]. *Ship Building of China*, 2000, 41(1): 21-25.)