

文章编号: 1001-0920(2008)09-1011-04

活套系统的神经网络离散变结构控制

童朝南, 武延坤, 王丽君, 李江昀
(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对带钢热连轧中活套系统的解耦控制问题, 提出了神经网络变结构多变量解耦控制方法. 通过将活套高度和张力的复合控制系统看成高度和张力的两个独立的控制系统, 将二者的耦合关系当作扰动来处理, 根据全阶滑模变结构控制理论, 分别对这两个系统设计控制器. 利用两个径向基神经网络来保证滑模可达条件的满足. 最后用 Matlab 对活套多变量耦合控制系统进行仿真研究, 结果表明解耦后的活套控制系统可获得更好的控制效果.

关键词: 活套系统; 变结构控制; 全阶滑模; 神经网络

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Discrete variable structure control based on neural network on looper system

TONG Chaoran, WU Yan-kun, WANG Li-jun, LI Jiang-yun

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

Correspondent: WU Yan-kun, E-mail: 2003wyk@sohu.com)

Abstract: The sliding mode variable structure control strategy is proposed to complete decoupling control of the loopers height and tension system in hot strip mill. By regarding looper height and tension control system as two independent systems and regarding the coupling between each other as disturbance, the controller of every sub-systems is designed based on full-order sliding mode variable structure theory. Two RBF neural networks are used to ensure that the reachability condition of sliding mode is satisfied. Finally, the looper multivariable coupling control system is simulated by using Matlab, the results show the effectiveness of this algorithm.

Key words: Looper system; Variable structure control; Full-order sliding mode; Neural network

1 引 言

在板带热连轧中, 采用活套控制轧制张力是其基本特征之一. 如果轧件所受的张力超过一定值, 便会产生一系列降低产品质量的不良后果, 如轧件被拉窄和缩颈等. 因此需对活套进行双重控制, 即活套高度控制和张力控制.

传统的活套控制是通过调整上游机架轧辊速度, 使活套高度维持在设定值附近; 通过控制活套电机力矩, 使机架间张力恒定. 在这种控制策略中, 活套高度控制与张力控制是完全独立的, 没有考虑二者之间存在的耦合关系. 而实际情况是: 当活套高度变化时, 机架间张力也会发生变化, 反之亦然. 即活套高度和张力系统是一个典型的双输入双输出耦合系统^[1].

变结构控制对于干扰和参数摄动具有很强的鲁

棒性, 但需要满足匹配条件. 文献[2, 3]设计了降阶的变结构控制器, 试图达到解耦的目的, 但这种控制器的滑模起始点不能主动控制, 当靠近原点时会失去解耦作用. 文献[4]提出一种全新的滑模设计理念, 即没有任何到达阶段的积分滑模. 本文利用活套系统数学模型完全适合变结构不变性匹配条件的特点, 通过设计全阶滑模动态变结构控制器, 使系统一开始便运行在滑模面上, 可实现完全解耦和对干扰的鲁棒性^[5]; 同时由于滑模运动含有积分项, 可对给定运动实现准确跟踪, 满足精度要求.

人工神经网络具有较强的学习能力和高度的并行运算能力, 能充分逼近任意复杂的非线性关系, 并具有较强的鲁棒性和容错性^[6, 7]. 近年来, 神经网络与滑模变结构控制的结合, 已成为变结构控制的一个新方向. 本文利用径向基神经网络(RBFNN), 驱动

收稿日期: 2007-06-18; 修回日期: 2008-02-15.

基金项目: 国家发改委高新技术项目([2005]1899); 北京市教委重点学科共建项目(XK100080537).

作者简介: 童朝南(1955—), 男, 安徽无为, 人, 教授, 博士生导师, 从事轧钢生产过程智能控制等研究; 武延坤(1979—), 女, 辽宁阜新, 人, 博士生, 从事热连轧非线性控制的研究.

系统运动在离散滑模面上,使系统抖振明显降低.

2 基于 RBF 神经网络的滑模控制

2.1 全阶变结构控制器的设计

设计全阶变结构控制器

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ef(k). \quad (1)$$

令 $e(k) = r(k) - x_1(k)$, $z(k) = z(k-1) + Te(k)$. 其中: x_1 是输出项, r 是输入项, $z(k)$ 是输入与输出误差的积分项, f 是干扰信号, T 是采样周期.

设计切换函数^[8]

$$s(k) = Cx(k) + K_I z(k) + K_D e(k). \quad (2)$$

其中: K_I 是积分控制增益; K_D 是微分控制增益; $C = [c_1, \dots, c_n]$, c_i 是常数, $c_n = 1$. K_I , K_D 和 c_i 待定.

由式(1)和(2)得

$$s(k+1) = C(Ax(k) + Bu(k) + Ef(k)) + k_I z(k+1) + k_D e(k+1). \quad (3)$$

当滑模到达理想状态时,有

$$s(k+1) = s(k). \quad (4)$$

由式(2)~(4)可得等效控制

$$u_{eq}(k) = -(CB)^{-1} \{ C(A - I)x(k) + k_I [z(k+1) - z(k)] + k_D [e(k+1) - e(k)] + CEf(k) \}. \quad (5)$$

2.2 积分控制增益和切换面的确定

在滑模运动中,当滑模 $s(k) = 0$ 时,由式(1)描述的系统可化为矩阵形式

$$X = AX + BV + E, \quad V = GX. \quad (6)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ -K_D \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad X = \begin{bmatrix} Z \\ X_1 \\ \dots \\ X_{n-1} \end{bmatrix}_{n \times 1},$$

$$G = [-K_I, -(c_1 + K_D), -c_2, \dots, -c_{n-1}].$$

文献[9]采用线性二次型最优控制的方法确定切换面,但由于加权矩阵和系统性能指标没有定量的关系,得到的切换面不一定理想.采用含义明确的极点配置方法可避免上述问题.

假设滑模运动希望配置的极点为 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$,由文献[5]介绍的 Ackermann 公式可方便地求出极点配置的反馈矩阵,得到 $G = -e^T P(A)$. 其中: $e^T = (0, \dots, 1)$; $P(\lambda) = (\lambda - \lambda_1) \dots (\lambda - \lambda_n)$. 从 G 的表达式可以看出, K_I , K_D 和 c_1, \dots, c_{n-1} 有一个变量为自由变量,在实际调试中 K_D 值很小,因此可先令 K_D 为零,再调整 K_D 值,看滑模

的极点变化是否可以接受.这样逐渐调整,直到满意为止.

2.3 神经滑模控制器设计

为了驱使系统运动在滑模面上,将 $s(k)$ 和 $s(k-1)$ 作为 RBF 神经网络的输入,网络的输出^[10]为

$$u_n(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_m h_m, \quad (7)$$

$$h_j = \exp(-\|X - C_j\|^2 / 2b_j^2). \quad (8)$$

其中

$$C_j = [c_{j1}, \dots, c_{jn}], \quad b_j = [b_{j1}, \dots, b_{jn}],$$

$$W = [w_1, \dots, w_j, \dots, w_m]^T,$$

m 为隐含层个数, $j = 1, 2, \dots, m$.

选择神经网络学习指标

$$E(k) = \frac{1}{2} s(k)^2. \quad (9)$$

根据梯度下降法,神经网络权值学习算法如下:

$$w_j = -\partial E(k) / \partial w_j =$$

$$-s(k) \frac{\partial s(k)}{\partial u_n(k)} \frac{\partial u_n(k)}{\partial w_j} = -s(k) C B h_j, \quad (10)$$

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta [w_j(k-1) - w_j(k-2)], \quad (11)$$

$$b_j = -\frac{\partial E(k)}{\partial b_j} = -s(k) \frac{\partial s(k)}{\partial u_n(k)} \frac{\partial u_n(k)}{\partial b_j} = -s(k) C B w_j h_j \frac{x_n - C_{jn}}{b_j^3}, \quad (12)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta [b_j(k-1) - b_j(k-2)]. \quad (13)$$

系统总的控制律为

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_n(k). \quad (14)$$

3 活套系统模型

液压活套高度和张力的综合控制系统是强耦合的双入双出系统,控制量分别是活套液压缸伺服阀的电流和主轧机的轧辊线速度,期望输出是活套的高度和热轧带钢的张应力.该系统一般为不稳定系统,活套机构动力如图 1 所示.

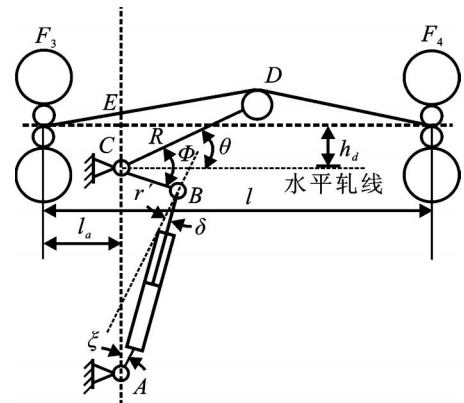


图 1 活套机构动力示意

活套张力矩^[11]为

$$M_T = M_T(w, h, \dots) = w h T_T(\dots). \quad (15)$$

其中： σ 为带钢受到的张应力， w 为带钢板宽， h 为带钢板厚， $T_T(\cdot)$ 为张力矩随角度变化的非线性系数。

活套重力矩为

$$M_W = M_W(w, h, \sigma) = whT_T(\sigma), \quad (16)$$

其中 $T_T(\cdot)$ 为重力矩随角度变化的非线性系数。

活套运动转矩平衡方程为

$$M = M_T + M_W + M_D, \quad (17)$$

其中： M 为活套液压缸折算到活套上的总动力矩， M_T 为活套张力矩， M_W 为活套重力矩， M_D 为活套动力矩。

套量和张力可认为是由于相邻两机架速度差异而成套，或使带钢拉伸而产生张力。

套量方程为

$$l_{loop} = \int (v_{i+1} - v_i) dt. \quad (18)$$

张应力方程为

$$\sigma = \frac{E}{l} \int (v_{i+1} - v_i) dt. \quad (19)$$

其中： σ 为带钢受到的张应力， E 为带钢杨氏模量， l 为机架间的距离， v_i 为本机架出口带钢的速度， v_{i+1} 为下游机架带钢的入口速度。

在线性工作点作相应的线性化处理，所用的非线性函数^[12] 为

$$\sigma = \arctan \frac{R \sin \theta + r}{R \cos \theta}, \quad (20)$$

$$R = \sqrt{R^2 + 2Rr \sin \theta + r^2}, \quad (21)$$

$$l_{loop} = \frac{1}{\sqrt{(l_a + R \cos \theta)^2 + (R \sin \theta - h_d + r)^2} + \sqrt{(l - l_a - R \cos \theta)^2 + (R \sin \theta - h_d + r)^2}} - l, \quad (22)$$

$$f_i = \frac{R l}{r} \sigma^2, \quad (23)$$

$$= \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{R_1}} \tan \left[\frac{1}{2} \arctan \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{1 - \frac{h}{K}}} + \frac{1}{8} \ln \left(1 - \frac{\sqrt{h}}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h}{R_1}} \left(\frac{-f_i}{K} - \frac{h}{K} \right) \right) \right]. \quad (24)$$

其中： θ 为中性角， R 为活套工作臂长度， r 为活套辊半径， R_1 为轧辊半径， ξ 为相对变形程度， f_i 为前张应力， f_{i+1} 为后张应力， K 为金属变形阻力。

利用影响系数法在工作点作线性化处理，可得系统物理量的动态结构如图 2 所示。以 i_{ref} 和 V_{ref} 为系统输入， $\Delta\theta$ 和 $\Delta\tau_3$ 为系统输出，则活套系统耦合传递函数矩阵表达式为

$$\begin{cases} \Delta\theta = G_{11}(s) i_{ref} + G_{12}(s) V_{ref}, \\ \Delta\tau_3 = G_{21}(s) i_{ref} + G_{22}(s) V_{ref}. \end{cases} \quad (25)$$

4 仿真研究

基于全阶滑模变结构控制器的思想，将活套高度和张力的复合控制系统分别看作高度和张力两个独立的控制系统。在研究高度系统时，将张力耦合作用看作扰动；同理，在研究张力系统时，将高度耦合作用看作扰动。分别对两个通路设计滑模变结构控制器，从而达到解耦的效果。

以某热轧厂 3# 主轧机和活套参数为例，活套高度和张力的工作点为： $\theta = 26^\circ$ ，张应力 $f_3 = 4.8 \text{ MPa}$ ，带钢宽度 $w = 1000 \text{ mm}$ ，机架入口厚度 $h_0 = 9.44 \text{ mm}$ ，出口厚度 $h = 5.69 \text{ mm}$ ，采样周期 $T = 10 \text{ ms}$ 。

将式(25) 离散化，如下式所示：

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.001 \\ -0.002 & 0.9972 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 26.026 \\ -34.035 \end{bmatrix} u_1(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f_1(k),$$

$$\begin{bmatrix} x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.001 \\ -0.016 & 0.998 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.139 \\ 1.4502 \end{bmatrix} u_2(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f_2(k).$$

其中

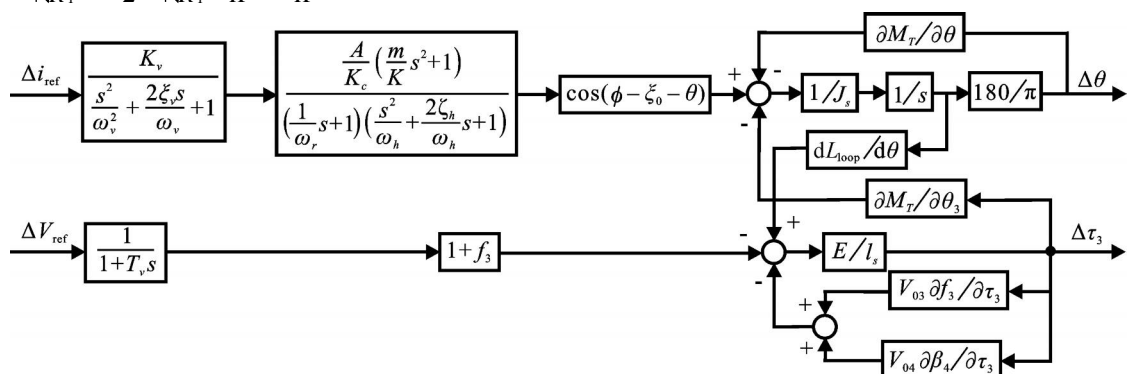


图 2 活套系统线性化模型

$$f_1(k) = -7.7279 \times 10^{-3} x_3(k),$$

$$f_2(k) = 2.7572(x_1(k) - x_1(k-1)).$$

式中: x_1 和 x_3 分别为活套角度变化量和带钢张应力变化量, f_1 为 x_1 与 x_3 的部分耦合关系, f_2 为 x_1 与 x_1 的部分耦合关系。

实际的活套长度为 750 mm, 对活套高度附加 10% 左右(即角度为 3°) 的阶跃扰动信号。RBF 神经网络结构取为 2-6-1, 学习速率分别为 $\eta_1 = 0.45$, $\eta_2 = 0.8$, 惯性系数分别为 $\alpha_1 = 0.04$, $\alpha_2 = 0.08$ 。

根据前面介绍的 Ackermann 公式, 当高度系统的滑模极点为 $\lambda_1 = -5$, $\lambda_2 = -15$, 张力系统的滑模极点为 $\lambda_3 = -20$, $\lambda_4 = -30$ 时, 可得

$$C_1 = [1.4578, 1], k_{11} = -7.2959, k_{1D} = 0.05;$$

$$C_2 = [45.1217, 1], k_{21} = -306.814, k_{2D} = 0.1.$$

在活套高度和张力的复合控制系统中, 张应力对带钢的影响相对较大。活套高度控制主要是给热连轧机速度匹配提供一定的裕度, 使其能在一定范围内满足要求; 不利因素是活套高度波动通过耦合影响到带钢张力, 引起带钢宽度和厚度的变化。因此, 活套控制系统本质上是使活套高度和张力很好地稳定在设定值附近, 使活套稳定工作, 避免由于张力波动所引起的板带厚度和宽度的变化, 从而提高产品质量。

解耦后活套高度增量和带钢张应力增量的变化曲线如图 3 所示。其中: 实线为本文方法的响应曲线, 虚线为基于 LMI 方法的响应曲线。可以看出, 神经网络变结构控制器优于 LMI 控制器。仿真结果表

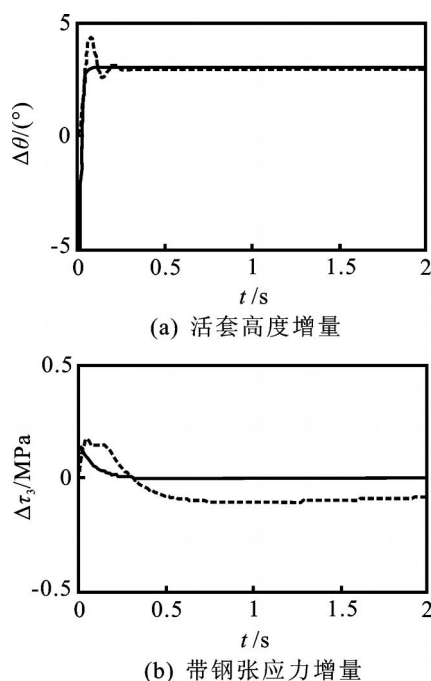


图3 活套系统解耦响应曲线

明, 采用神经滑模变结构控制策略对活套高度和张力多变量耦合系统进行解耦控制, 系统的耦合程度大大减小, 具有响应速度快、自适应性好、抗干扰能力强等优点。

5 结 论

本文针对轧钢生产中的活套控制问题, 提出了基于径向基神经网络全阶滑模变结构的活套高度和张了解耦控制方法。将该方法应用于现场液压活套系统进行仿真, 结果表明解耦后的活套控制系统可获得更好的控制效果, 优于传统的控制方法和 LMI 控制方法, 证明了高度和张了解耦控制方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] 张殿华, 郑芳, 王国栋. 板带热连轧机活套高度和张力的解耦控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 158-160, 216.
(Zhang D H, Zheng F, Wang G D. Strip tandem hot rolling loopers' height and tension decoupling control [J]. Control and Decision, 2000, 15(2): 158-161, 216.)
- [2] 张锦江, 陈兴林, 冯汝鹏, 等. 基于摩擦自适应补偿的转台变结构控制器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 92-95.
(Zhang J J, Chen X L, Feng R P, et al. Design of variable structure controller based on friction adaptive compensation[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2000, 3(4): 92-95.)
- [3] 张锦江, 冯汝鹏, 陈兴林, 等. 仿真转台解耦的鲁棒自适应模糊化设计[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(2): 155-158.
(Zhang J J, Feng R P, Chen X L, et al. The robust adaptive fuzzy decoupling design of simulator[J]. J of System Simulation, 2000, 12(2): 155-158.)
- [4] Utkin V, Shi J. Integral sliding mode in systems operating under uncertainty conditions[C]. Proc of 35th IEEE Conf on Decision and Control. New York: IEEE Service Center, 1996: 4591-4596.
- [5] Ackermann J, Utkin V. Sliding mode control design based on Ackermann's formula [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(2): 234-237.
- [6] Hunt K J, Sbarbaro B, Zbikowski R, et al. Neural networks for control system: A survey [J]. Automatica, 1992, 28(6): 1083-1112.
- [7] Narendra K S, Parthasarathy K. Identification and control of dynamic systems using neural networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1990, 1(1): 4-27.

(下转第 1020 页)

Logistic 判别式方法的正确率(77.7%)略低,但本文提取的规则简单易懂,执行效率高。

4 结 论

本文提出一种新的面向分类问题的模糊规则提取方法,可快速提取易于理解的简单规则,并得到分类趋势曲面。不同于当前的模糊规则提取算法,新方法采用基于最小熵的 Chi-merge 方法划分输入空间,基于空间划分产生相应的分类规则,每条规则带有概率属性,以提高分类精度。提取的规则无需任何调整即可获得较高的准确性,从而大大提高了分类效率。

本文的模糊规则提取算法支持对新增数据的简单更新。下一步工作将结合前项和后项研究规则更新算法,以提高模糊规则的增量式学习更新能力。

致 谢 特别感谢浙江工业大学海外人才引进计划提供的合作研究机会;对于美国辛辛那提大学智能系统实验室的研究支持和帮助深表谢意!

参考文献(References)

- [1] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [2] Mamdani E H, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. Int J of Man-machine Studies, 1975, 7(1): 1-13.
- [3] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [4] Wang L X, Mendel J. Generating fuzzy rules by learning from examples[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1992, 22(6): 1414-1427.
- [5] Wang L X. WM method completed: A flexible fuzzy system approach to data mining[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2003, 11(6): 880-904.
- [6] Yage R R, Filev D P. Generation of fuzzy rules by mountain clustering[J]. J of Intelligent and Fuzzy System, 1994, 2(3): 209-219.
- [7] Kim J, Kasabov N K. HyFIS: Adaptive neuro-fuzzy inference systems and their application to nonlinear dynamical systems[J]. Neural Networks, 1999, 12(9): 1301-1319.
- [8] Kerber R. Chi-merge: Discretization of numeric attributes[C]. Proc of AAAI-92. San Jose: MIT Press, 1992: 129-134.
- [9] Shannon C, Weaver W. The mathematical theory of information[M]. Urban: University of Illinois Press, 1948.
- [10] Merz C J, Murphy P M. UCI repository of machine learning database[R]. Irvine: University of California, 1996.
- [11] Park Y J, Kim B C, Chun S H. New knowledge extraction technique using probability for case-based reasoning: Application to medical diagnosis[J]. Expert Systems, 2006, 22(1): 2-20.
- [12] Duch W, Adamczak R, Grabczewski K. New methodology of extraction, optimization and application of crisp and fuzzy logic rules[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2000, 11(2): 1-31.
- [13] Michie D, Spiegelhalter D J, Taylor C C. Machine learning, neural and statistical classification[M]. London: Elis Horwood, 1994.
- [8] 于金盈, 许宏光, 赵克定, 等. 全阶滑模变结构解耦控制器在液压转台设计中的应用[J]. 航空学报, 2005, 26(3): 376-379.
(Yu J Y, Xu H G, Zhao K D, et al. Application of full-order sliding mode variable structure decoupling controller to hydraulic simulator design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 376-379.)
- [9] Chern T L, Wu Y C. An optimal variable structure control with integral compensation for electro hydraulic position servo control systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1992, 39(5): 460-463.
- [10] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(Liu J K. Matlab simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [11] Han J, Micheline K. Data mining: Concepts and techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 225-278.
- [12] 李博群, 张克君, 傅剑, 等. 活套高度和张力系统的神经网络自适应解耦控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(1): 46-50.
(Li B Q, Zhang K J, Fu J, et al. Adaptive neural network decoupling control for the loopers' height and tension system[J]. Control and Decision, 2006, 21(1): 46-50.)

(上接第 1014 页)