

文章编号: 1001-0920(2002)01-0085-04

# 大射电望远镜馈源轨迹跟踪的模糊预测控制

苏玉鑫<sup>1</sup>, 段宝岩<sup>1</sup>, 彭勃<sup>2</sup>, 南仁东<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国科学院 北京天文台, 北京 100012)

**摘要:** 针对新一代大射电望远镜悬索馈源系统为时变大滞后的被控对象, 并充分考虑易于实现的工程要求, 提出一种由模糊预测器和模糊控制器组成的馈源轨迹跟踪自适应模糊预测控制方案。数值仿真证明了该方案的有效性。

**关键词:** 模糊控制; 预测控制; 大射电望远镜; 轨迹跟踪; 大时滞

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

## Adaptive fuzzy predictive tracking of the feed for large radio telescopes

SU Yu-xin<sup>1</sup>, DUAN Bao-yan<sup>1</sup>, PENG Bo<sup>2</sup>, NAN Ren-dong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Encounter to the characteristics of nonlinearity, time-varying and large delay constant of the cable-feed system for next generation large radio telescopes and the requirement of easy engineering implementation, an adaptive fuzzy predictive control (AFPC) strategy is proposed to realize the feed tracking for large radio telescopes. The AFPC consists of fuzzy predictor and fuzzy predictive controller, which are trained by using BP algorithm. The simulation results show the effectiveness of the AFPC to guarantee the coarse tracking accuracy requirement for large radio telescopes, which have laid a solid base for the engineering implementation of the high accuracy requirement of the feed tracking for large radio telescopes.

**Key words:** fuzzy control; predictive control; large radio telescope; trajectory tracking; large delay

## 1 引言

进入 21 世纪以来, 人们越来越意识到需要一种新的大射电望远镜(LT), 能将现有的观测水平提高两个数量级。针对世界上最大的射电望远镜——美国 Arecibo 大望远镜设计方案的弱点, 文献[1]提出了“光机电一体化”的设计方案: 采用悬索直接拖动

馈源以实现馈源空中的扫描运动, 完全抛弃了原方案的背架支撑结构, 使馈源系统的重量从 800 多吨降为 20 吨左右, 大大降低了工程造价和工程实现难度。

由于采用大跨度的悬索来拖动馈源实现高精度轨迹跟踪(稳态跟踪精度小于 4 mm), 而柔性悬索为一大滞后的被控对象, 且馈源系统的重量多达

收稿日期: 2000-10-30; 修回日期: 2001-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(59675040, 50075065); 中科院知识创新工程大射电望远镜关键项目

作者简介: 苏玉鑫(1969—), 男, 辽宁建昌人, 副教授, 博士生, 从事机电一体化研究; 段宝岩(1955—), 男, 河北冀县人, 副

© 1994-2011 校长, 教授, 博士生导师, 从事电子机械的现代理论与方法、机电一体化研究。reserved. <http://www.cnki.net>

20 t 左右,对于满足高精度轨迹跟踪难度较大。因此,文献[2]提出了采用 Stewart 型平台作为精调平台的改进设计方案,Stewart 精调平台在悬索粗调的基础上满足轨迹跟踪的高精度要求,并在假设粗调精度为 30 cm 的前提下,验证了所述方案的可行性,但未涉及粗调精度能否满足上述假设。

本文提出一种包括模糊预测器和模糊控制器的自适应模糊预测控制器,实现馈源轨迹跟踪控制。其中的预测器和控制器均采用 BP 算法进行在线修正。

## 2 大射电望远镜轨迹跟踪控制策略

考虑工程实现的可行性和造价,大射电望远镜馈源轨迹粗调跟踪控制采用分散控制策略,其系统结构如图 1 所示。

在馈源轨迹跟踪过程中,激光检测系统不断实时检测馈源在空中的实际轨迹,并与期望轨迹进行比较,由主计算机根据偏差信号实现每根悬索索长的实时规划,求得索长并输入相应的单片机 8098 控制系统,单片机控制系统通过合适的控制算法控制伺服电机的转速,从而控制馈源在空中的运动轨迹,使其满足轨迹跟踪精度的要求。换言之,主计算机主要完成每根悬索的运动轨迹规划,保证悬索的协调运动。而每根悬索的位置执行精度则由相应单片机控制系统中的控制算法来保证。

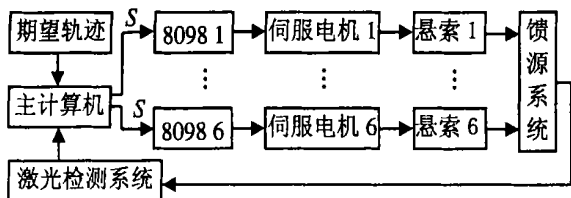


图 1 大射电望远镜馈源轨迹跟踪分散控制结构

由于 6 根悬索单片机系统中的控制算法都相同,在此仅研究其中之一。单根悬索闭环位置控制系统如图 2 所示,它主要由 8098 单片机、PWM 功率放大器、直流伺服电机、悬索和增量式光电编码器组成。图中,  $S_d$  为主计算机轨迹规划的悬索的期望长度,  $S$  为由增量式编码器检测到的悬索的实际长度,

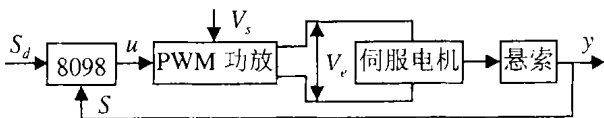


图 2 单根悬索闭环位置控制系统

$u$  为 PWM 控制量输入信号,  $V_s$  为直流电源电压,  $V_e$  为直流伺服电机电枢电压。

## 3 大射电望远镜轨迹跟踪自适应模糊预测控制

### 3.1 模糊预测器和模糊预测控制器<sup>[3]</sup>

考虑如下离散非线性被控系统

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n+1); u(k), \dots, u(k-m+1)) \quad (1)$$

其中,  $u$  和  $y$  分别为被控对象的输入和输出。设该对象可由  $M$  条模糊规则表示,其中第  $l$  条规则可表示为

$R_p^{(l)}$ : If  $x_1(k)$  is  $F_1^l$  and  $x_2(k)$  is  $F_2^l$  and ...

and  $x_{n+m}(k)$  is  $F_{n+m}^l$  Then  $\hat{y}(k+1)$  is  $G^l$

其中,  $F_i^l$  和  $G^l$  为模糊集合,  $l = 1, 2, \dots, M; x_1(k), \dots, x_{n+m}(k)$  均为语言变量,它们可表示为

$$\begin{cases} x_i(k) = y(k-i+1) \\ i = 1, 2, \dots, n \\ x_i(k) = u(k+n-i+1) \\ i = n+1, \dots, n+m \\ \hat{y}(k+1) = y(k+1) \end{cases} \quad (2)$$

取如下高斯型函数作为隶属函数,即

$$\mu_{F_i^l}(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right] \quad (3)$$

其中  $\bar{x}_i^l$  和  $\sigma_i^l$  分别为第  $l$  个模糊子集高斯型隶属函数的宽度和中心值。采用重心非模糊化方法和模糊蕴含推理规则,可得到如下形式的输出<sup>[4]</sup>

$$\hat{y}(k+1) = \sum_{l=1}^M \bar{y}^l(k) z_x^l(k) / b_x(k) \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} z_x^l(k) = \prod_{i=1}^{n+m} \exp\left[-\left(\frac{x_i(k) - \bar{x}_i^l(k)}{\sigma_i^l(k)}\right)^2\right] \\ b_x(k) = \sum_{l=1}^M z_x^l(k) \end{cases} \quad (5)$$

$\bar{y}^l(k)$  为模糊子集  $G^l$  的中心值。据此,可得如下的  $N$  步超前输出预测

$$\begin{aligned} x_1(k+j-1) &= \hat{y}(k+j-1) \\ j &= 1, 2, \dots, N \\ x_i(k+j-1) &= x_{i-1}(k+j-2) \\ i &= 2, 3, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, N \\ x_{n+1}(k+j-1) &= u(k+j-1) \\ j &= 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

$$x_i(k+j-1) = x_{i-1}(k+j-2)$$

$$i = n + 2, \dots, n + m, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

$$\hat{y}^l(k + j) = \prod_{l=1}^M \bar{y}^l(k) z_x^l(k + j - 1) \setminus b_x(k + j - 1), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} z_x^l(k + j - 1) = \\ \prod_{i=1}^{n+m} \exp \left[ - \left( \frac{x_i(k + j - 1) - \bar{x}_i^l(k)}{\sigma_i^l(k)} \right)^2 \right] \\ b_x(k + j - 1) = \prod_{i=1}^M z_x^l(k + j - 1) \end{cases} \quad (7)$$

采用广义预测控制算法设计模糊预测控制器。控制长度取 1, 预测长度为  $N$ 。令  $u(k + j) = u(k)$ , 其中  $u$  为模糊预测控制器的输出,  $j = 1, 2, \dots, N$ 。性能指标取

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (y_r(k + j) - y(k + j))^2 + \lambda (u(k))^2 \quad (8)$$

式中,  $y_r(k + j)$  为参考输入, 为控制作用的加权因子。

设有  $L$  条模糊预测控制规则, 其中第  $l$  条规则可表示为

$R_c^{(l)}$ : If  $c_1(k)$  is  $P_1^l$  and  $c_2(k)$  is  $P_2^l$  and ... and  $c_{N+n+m-1}(k)$  is  $P_{N+n+m-1}^l$  Then  $u(k)$  is  $H^l$

其中,  $P_i^l$  和  $H^l$  为模糊子集,  $l = 1, 2, \dots, L$ ;  $c_i(k)$  和  $u(k)$  为语言变量, 可表示为

$$\begin{cases} c_i(k) = y_r(k + i), \quad i = 1, 2, \dots, N \\ c_i(k) = y(k + i - N + 1) \\ \quad i = N + 1, \dots, N + n \\ c_i(k) = u(k - i + N + n) \\ \quad i = N + n + 1, \dots, N + n + m - 1 \end{cases} \quad (9)$$

$P_i^l$  仍选高斯型函数作为隶属函数, 即

$$\mu_{P_i^l}(c_i) = \exp \left[ - \left( \frac{c_i - \bar{c}_i^l}{\sigma_{c_i}^l} \right)^2 \right] \quad (10)$$

因此, 模糊预测控制的输出可表示为

$$u(k) = \prod_{i=1}^L \bar{u}^l(k) z_u^l(k) \setminus b_u(k) \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} z_u^l(k) = \prod_{i=1}^{N+n+m-1} \exp \left[ - \left( \frac{c_i(k) - \bar{c}_i^l(k)}{\sigma_{c_i}^l(k)} \right)^2 \right] \\ b_u(k) = \prod_{i=1}^L z_u^l(k) \end{cases} \quad (12)$$

$\bar{c}_i^l$  和  $\sigma_{c_i}^l$  分别为第  $l$  个模糊控制作用  $u$  的隶属函数的宽度和中心值,  $\bar{u}^l$  为模糊子集  $H^l$  的中心值。

### 3.2 模糊预测器和模糊预测控制器的修正

采用 BP 算法实现模糊预测器和模糊预测控制器的修正。模糊预测器的修正, 实际上是对其隶属函数的参数  $\bar{x}_i^l, \sigma_i^l$  和  $\bar{y}^l$  的修正。误差函数取

$$E = \frac{1}{2} [y(k + 1) - \hat{y}(k + 1)]^2 \quad (13)$$

应用 BP 算法, 可得如下修正公式

$$\begin{cases} \bar{y}^l(k + 1) = \\ \bar{y}^l(k) - \eta e(k + 1) z_x^l(k) / b_x(k) \\ \bar{x}_i^l(k + 1) = \\ \bar{x}_i^l(k) - 2\eta e(k + 1) z_x^l(k) \times \\ [\bar{y}^l(k) - \hat{y}(k + 1)] [x_i(k) - \bar{x}_i^l(k)] / \\ [b_x(k) \sigma_i^l(k)]^2 \\ \sigma_i^l(k + 1) = \sigma_i^l(k) - 2\eta e(k + 1) z_x^l(k) \times \\ [\bar{y}^l(k) - \hat{y}(k + 1)] [x_i(k) - \bar{x}_i^l(k)] / \\ [(b_x(k))^2 (\sigma_i^l(k))^3] \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\eta$  为学习因子,  $e(k + 1) = \hat{y}(k + 1) - y(k + 1)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n + m, l = 1, 2, \dots, M$ 。

同理, 模糊预测控制的修正也是对隶属函数的参数  $\bar{c}_i^l, \sigma_{c_i}^l$  和  $\bar{u}^l$  的修正, 其误差函数与性能指标  $J$  相同, 仍采用 BP 算法实现。

根据式 (11), 可得到如下表达式

$$\begin{cases} \frac{\partial u(k)}{\partial \bar{u}^l(k)} = \frac{z_u^l(k)}{b_u(k)} \\ \frac{\partial u(k)}{\partial \bar{c}_i^l(k)} = \frac{2z_u^l(k) (\bar{u}^l(k) - u(k))}{b_u(k)} \times \\ \frac{c_i(k) - \bar{c}_i^l(k)}{(\sigma_{c_i}^l(k))^2} \\ \frac{\partial u(k)}{\partial \sigma_{c_i}^l(k)} = \frac{2z_u^l(k) (\bar{u}^l(k) - u(k))}{b_u(k)} \times \\ \frac{c_i(k) - \bar{c}_i^l(k)}{(\sigma_{c_i}^l(k))^3} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N + m + n - 1, l = 1, 2, \dots, L$ 。并令

$$\begin{cases} V^l(k) = [\bar{u}^l(k), \bar{c}_{11}^l(k), \dots, \bar{c}_{(N+n+m-1)}^l(k), \\ \sigma_{c_{11}}^l(k), \sigma_{c_{21}}^l(k), \dots, \sigma_{c_{(M+n+m-1)}^l(k)] \\ V(k) = [V^1(k), V^2(k), \dots, V^L(k)]^T \end{cases} \quad (16)$$

于是,  $\frac{\partial u(k)}{\partial V(k)}$  可由式 (15) 得到。

同理, 令

$$e_c(k + j) = y_r(k + j) - y(k + j)$$

$$\frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial V(k)} = \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial V(k)} \quad (17)$$

注意到当  $i = j$  时,  $u(k+j-i) = u(k)$ , 则有如下关系

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial V(k)} = & \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial y(k+j-i)} \frac{\partial \hat{y}(k+j-i)}{\partial V(k)} + \\ & \sum_{i=1, i=j}^m \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial u(k+j-i)} \Big|_{u(k+j-i)=u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial V(k)} \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)可写成

$$\frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial V(k)} = \delta(j) \frac{\partial u(k)}{\partial V(k)}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

其中  $\delta(j)$  可通过如下迭代方式得到

$$\begin{cases} \delta(1) = \frac{\partial \hat{y}(k+1)}{\partial u(k)} \\ \delta(j) = \sum_{i=1, i \neq j}^n \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial y(k+j-i)} \delta(j-i) + \\ \sum_{i=1, i=j}^m \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial u(k+j-i)} \delta(j-i) \Big|_{u(k+j-i)=u(k)} \end{cases} \quad j = 2, 3, \dots, N \quad (20)$$

由式(6)有

$$\begin{cases} \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial x_i(k+j-1)} = \\ \frac{-2}{b_x(k+j-1)} \sum_{l=1}^M [\bar{y}^l(k) - \\ \hat{y}(k+j)] z_x^l(k+j-1) \times \\ \frac{[x_i(k+j-1) - x_i^l(k)]}{(\sigma^l(k))^2} \\ i = 1, 2, \dots, n+m \\ \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial y(k+j-1)} = \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial x_i(k+j-1)} \\ i = 1, 2, \dots, n, \quad i = j-1 \\ \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial u(k+j-1)} = \frac{\partial \hat{y}(k+j)}{\partial x_{n+i}(k+j-1)} \\ i = 1, 2, \dots, m, \quad i = j \end{cases} \quad (21)$$

应用式(8), 得

$$\frac{\partial J}{\partial V(k)} = \delta_v(k) \frac{\partial u(k)}{\partial V(k)} \quad (22)$$

式中

$$\delta_v(k) = - \sum_{j=1}^N e_c(k+j) \delta(j) + \lambda u(k) \quad (23)$$

采用梯度下降算法, 可得如下参数修正公式

$$V(k+1) = V(k) - \eta_c \delta_v(k) \frac{\partial u(k)}{\partial V(k)} \quad (24)$$

其中  $\eta_c$  为学习因子。

## 4 LT 馈源轨迹跟踪仿真

虽然不能精确建立悬索-馈源系统的数学模型, 但可用伺服电机的二阶惯性环节加悬索的纯滞后环节来等效, 并采用一阶 Pade 近似纯滞后环节。单根悬索-伺服电机的传递函数可表示为<sup>[5]</sup>

$$G_i(s) = G_{mi}(s) G_{si}(s) = \frac{30}{(0.017s+1)(0.076s+1)} \frac{2-\tau_s}{2+\tau_s} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (25)$$

式中  $\tau_i$  为悬索的滞后时间常数, 它与悬索的长度和挠度直接相关, 可表示为  $\tau_i = S_i/\dot{S}_i$ 。其中  $S_i$  和  $\dot{S}_i$  分别为悬索的长度与其运动速度, 由文献[1]推导可得。因此, 将式(25)离散化, 便得到悬索-馈源系统的仿真模型。

工程的物理几何参数为: 大射电望远镜反射面口径 500 m, 塔高 150 m, 悬索的横截面积  $8 \text{ cm}^2$ , 弹性模量  $2.058 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ , 密度  $7.85 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$ , 馈源总重量 20 t。

取  $n = 2, m = 3, N = 4$ 。根据对被控对象的特性初步估计, 大致确定索长变化的基本论域为  $[-10, 10]$ , 控制输入  $u$  的基本论域为  $[-6, 6]$ , 语言变量值取 PL, PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB, NL 共 9 种, 模糊预测器和模糊控制器的规则数取  $M = L = 40$ 。根据上述基本论域的大小, 确定相应的隶属函数的初始参数, 然后采用 BP 算法进行在线修正。经过多次仿真, 确定 BP 算法的参数为  $\eta = 0.1, \lambda = 0.005, \eta_c = 0.2$ 。系统的采样周期为 0.5 s。仿真时, 把馈源的运动轨迹离散为 360 个点。馈源的轨迹跟踪误差如图 3 所示。

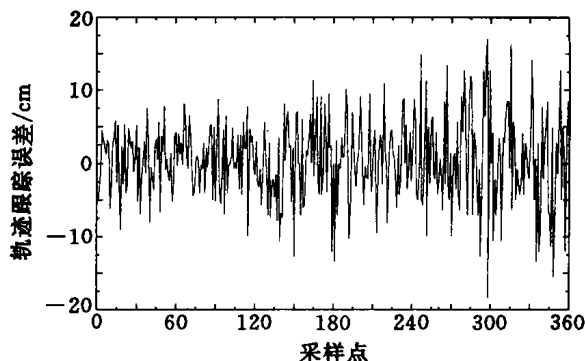


图 3 LT 馈源模糊预测控制轨迹跟踪误差

由图可见, 馈源轨迹具有良好的跟踪精度, 在整个轨迹跟踪空间内, 都能很好地满足 Stewart 精调平台的误差调节裕量(  $\pm 30 \text{ cm}$ ) 要求。

样周期为  $T_s = 0.5 \text{ s}$ , 当控制量为  $[-0.5, 0.5]$  的随机数时, 系统的输出与 CMAC 模型的输出比较如图 3 所示(虚线为 CMAC 输出)。

若取预测时域为 3, 控制时域为 3, 参考轨迹常数为  $\tau = 0.2$ , CMAC 的参数选择为  $\beta = 0.1$ ,  $A^* = 32$ ,  $A_p = 800$ , 并设定系统控制目标是将反应物的浓度由 0.2 上升到 0.8, 再由 0.8 降为 0.2 的方波, 则过程的预测控制跟踪曲线如图 4 所示。图中曲线 ① 为非线性对象仿真输出曲线。实验采用 C 语言编写程序, 运行结果在 MATLAB 环境下绘制图形。可见, 基于 CMAC 的预测控制器表现出良好的控制性能。

## 5 结 论

本文针对非线性预测控制实现上的困难, 提出一种基于 CMAC 的预测控制策略, 结合非线性优化方法, 实现了对具有一般意义的非线性系统的多步预测控制。仿真结果表明, 系统的收敛速度与控制效

果都有很大改观, 并且控制策略具有较好的稳定性和鲁棒性, 是实现非线性系统预测控制的一种有效途径。

算法实现的难点在于 CMAC 网络的结构和参数的选取。其中, hash 单元数的多少关系着碰撞发生的概率和学习速度, 泛化能力则取决于  $A^*$  的大小, 而学习因子的大小对过程的在线性能影响很大。仿真中这些因素需要综合考虑。

### 参考文献(References):

- [1] Albus J S. A new approach to manipulator control: The cerebellar model articulation controller (CMAC) [J]. IEEE Trans ASME, 1975, 97(3): 220-227.
- [2] Albus J S. Data storage in the cerebellar model articulation controller (CMAC) [J]. IEEE Trans ASME, 1975, 97(3): 228-233.
- [3] 王伟. 广义预测控制理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

(上接第 88 页)

## 5 结 论

本文采用模糊预测算法实现新一代大射电望远镜馈源轨迹跟踪自适应控制。文中给出了模糊预测器和模糊预测控制器的设计, 并采用 BP 算法实现在线修正以达到自适应控制。通过大射电望远镜悬索-馈源系统的时变大滞后二阶系统的数值仿真, 证明模糊预测控制算法可以满足馈源轨迹跟踪精度要求, 为新一代大射电望远镜国际合作项目的工程实现奠定了基础。

### 参考文献(References):

- [1] Duan B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear

dynamic analysis[J]. Mechatronics, 1999, 9(1): 53-64.

- [2] Su Y X, Duan B Y. The mechanical design and kinematics accuracy analysis of a fine tuning stable platform for the large spherical radio telescope[J]. Mechatronics, 2000, 10(7): 819-834.
- [3] 张阿卜. 利用 BP 算法的一种自适应模糊预测控制器[J]. 控制理论与应用(Control Theory and Appl), 1999, 16(2): 105-108.
- [4] 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [5] 苏玉鑫, 段宝岩. 大射电望远镜馈源轨迹跟踪自适应控制[J]. 控制理论与应用(Control Theory and Appl), 2002, 19(1).

(上接第 91 页)

### 参考文献(References):

- [1] R M Sanner, J J E Slotine. Gaussian networks for direct adaptive control[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 11(3): 837-863.
- [2] Young H Kim, Frank L Lewis, Chaouki T Abdallah. A

dynamic recurrent neural-network-based adaptive observer for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 1997, 33(8): 1539-1543.

- [3] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.