

鲁棒递归神经网络变结构控制同步电动机伺服系统

陈兴国, 李圣清

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 针对裹包机驱动系统控制精度较差的问题, 提出采用鲁棒递归神经网络变结构控制线性同步电动机伺服控制系统。仿真结果表明, 该控制系统提高了裹包机驱动系统的控制精度。

关键词: 同步电动机; 自适应控制算法; 裹包机; 神经网络

中图分类号: TP13; TB486

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)01-0088-05

The Variable-Structure Control of Robust Recurrent Neural Network on Synchronizer Motor Servo System

Chen Xingguo, Li Shengqing

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: In view of the poor control accuracy of wrapping machine drive system, proposes a linear synchronous motor servo control system using robust recurrent neural network variable structure control. Simulation results show that the system improves the control precision of the wrapping machine drive system.

Keywords: synchronous motor; adaptive algorithms; wrapping machine; neural network

接缝式裹包机中的信号控制凸轮自动定位差动器的3个锥齿轮差动器, 都具有结构简单紧凑、传动比准确、传动效率高、适用性强等优点, 在裹包机中获得广泛的应用^[1]。这些锥齿轮差动器, 由于控制方法复杂, 控制装置庞大, 因此较易出现故障, 控制不能达到预期要求。本文提出利用递归模糊神经网络(recurrent fuzzy neural network, 简称RFNN)估算实时大量的不准确信息, 使用RFNN变结构控制器对锥齿轮差动器进行控制, 以期获得高性能动态特性。从仿真结果来看, 递归模糊神经网络变结构控制器在参数变化的情况下, 能明显降低系统颤动现象和抗干扰的鲁棒性能。

1 线性同步电机数学模型

永久磁铁线性同步电动机的数学模型如下^[2-3]:

$$u_q = R_s i_q + \dot{\psi}_q + \omega_e \psi_d,$$

$$u_d = R_s i_d + \dot{\psi}_d - \omega_e \psi_q,$$

式中: $\psi_q = L_q i_q$; $\psi_d = L_d i_d + \psi_{PM}$; $\omega_e = N\omega_m$; u_d, u_q 为 d, q 轴电压; i_d, i_q 为 d, q 轴电流; R_s 为相绕组电阻; L_d, L_q 为 d, q 轴电感; ω_m 为电动机角速度; ω_e 为电角速度; ψ_{PM} 为永磁磁通链; N 为初极数目。

此外, $\omega_m = \pi v / \tau$, $v_e = Nv = 2\tau f_e$, 其中 v 是线速度, τ 是极间隔, v_e 是电线速度, f_e 是电频率。

由参考文献[4]得电动机的电磁功率如下:

$$P_e = F_e v_e = \frac{3}{2} N [\psi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \omega_e,$$

这样, 电磁力为

$$F_e = 3\pi N [\psi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] / (2\tau), \quad (1)$$

则电动机动态方程为

收稿日期: 2010-09-16

作者简介: 陈兴国(1942-)男, 湖南长沙人, 湖南工业大学教授, 主要从事模糊控制, 神经网络遗传控制等智能控制和电机控制研究, E-mail: chen_rock@163.com

$$F_c = M\dot{v} + Dv + w(t),$$

式中: M 为运动系统的总质量;

D 为黏性摩擦和铁损系数;

$w(t)$ 是外来扰动。

图 1 所示是矢量控制 PMLSM (permanent magnet linear synchronous motor, 即永磁线性同步电动机) 伺服驱动系统图。它是由 PMLSM、斜坡比较电流控制逆变器 PWM、矢量变换、坐标变换、速度控制环、位置控制环、线性比例和霍尔传感器组成的驱动系统。

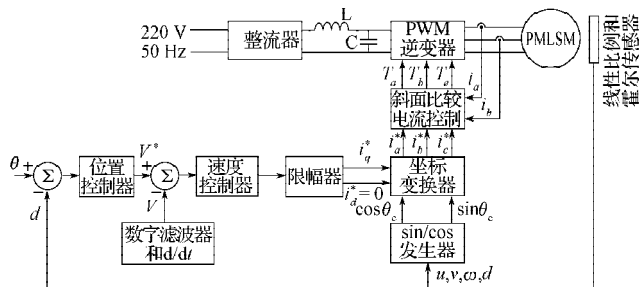


图 1 矢量 PMLSM 伺服驱动系统

Fig. 1 PMLSM vector servo drive system

永磁的磁通位置由 u_H, i_H 和 P_H (u_H, i_H, P_H 是指输入霍尔传感器的电压、电流和输出的功率) 所指示的霍尔传感器的输出信号进行检测。不同大小的铁饼安装在 PMLSM 电动机上, 用来改变运动元件的质量, 在矢量控制实现后, 如果 $i_d=0$, 并利用 $\psi_d = L_d i_d + \psi_{PM}$ 和式 (1) 可将 PMLSM 伺服驱动简化如下:

$$F_c = K_F i_q^*, \quad H(s) = \frac{1}{Ms + D} = \frac{b}{s + a},$$

式中: K_F 为推力系数, 且 $K_F = 3\pi N\psi_{PM}/(2\tau)$;

i_q^* 为推力电流命令;

s 为拉普拉斯变换;

$H(s)$ 为系统动态方程的拉氏变换;

$a = \bar{D}/\bar{M}$; $b = 1/\bar{M}$ 。

为便于控制器的设计, 在控制环中位置和速度信号置于 $1/K_v = 0.063\ 662\ \text{m/s}$, 系统参数为:

$$K_F = 20\ \text{N/A}, \quad a = 42.246, \quad b = 7.974,$$

$$\bar{M} = 1.97\ \text{kg} = 1.97\ \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m} =$$

$$1.97 \times 0.063\ 662\ \text{N} \cdot \text{s}/K_v = 0.125\ 4\ \text{N} \cdot \text{s}/K_v,$$

$$\bar{D} = 83.224\ 5\ \text{kg/s} = 83.224\ 5\ \text{N} \cdot \text{s}/\text{m} =$$

$$83.224\ 5 \times 0.063\ 662\ \text{N}/K_v = 5.298\ 2\ \text{N}/K_v。$$

2 变结构自适应位置控制器

在没有参数变化和外来负载扰动的情况下, PMLSM 驱动系统的动态方程为:

$$\bar{A}_1 \ddot{d}(t) + \bar{B}_1 \dot{d}(t) = U(t),$$

$$\text{式中: } \bar{A}_1 = \frac{\bar{M}}{K_F}; \quad \bar{B}_1 = \frac{\bar{D}}{K_F}; \quad U(t) = i_q^*(t);$$

$d(t)$ 表示 PMLSM 电动机的位置。

实际上同步电机驱动系统存在参数变化和外来负载扰动, 那么有

$$\tilde{A}_1 \ddot{d}(t) + \tilde{B}_1 \dot{d}(t) + C_1 F_L = U(t), \quad (2)$$

式中: \tilde{A}_1 和 \tilde{B}_1 应包括由系统参数 \bar{M} 和 \bar{D} 引入的未确定性, $C_1 = 1/K_F$ 和 F_L 是指对电动机驱动系统的外来负载扰动。

据式 (2) 并参考文献 [5] 得参考轨迹方程为:

$$\tilde{A}_1 (\ddot{d}_d(t) - \lambda \dot{d}_d(t)) + \tilde{B}_1 (\dot{d}_d(t) - \lambda \tilde{d}(t)) + C_1 F_L = W(t) \cdot \Theta, \quad (3)$$

式中: $d_d(t)$ 为期望的转子位置;

$\tilde{d}(t) = d(t) - d_d(t)$ 为跟踪误差;

λ 为设计者选择的位置比例;

$$W(t) = [\ddot{d}_d(t) - \lambda \dot{d}_d(t) \quad \dot{d}_d(t) - \lambda \tilde{d}(t) \quad C_1]^{-1};$$

$$\Theta = [\tilde{A}_1 \quad \tilde{B}_1 \quad F_L]^T。$$

假设不确定矢量 Θ 的上边界为 $\bar{\Theta}$, 而 Θ 应包括参数的变化和外来负载的扰动, 且是已知的, 那么变结构规律定义为:

$$\Theta_d(t) = -F(t) \bar{\Theta}, \quad (4)$$

$$\text{式中: } F(t) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(f_1(t)) & 0 & 0 \\ 0 & \text{sgn}(f_2(t)) & 0 \\ 0 & 0 & \text{sgn}(f_3(t)) \end{bmatrix},$$

$f_i(t) = W_i(t)S(t)$ ($i=1,2,3$), $W_i(t)$ 是 $W(t)$ 的分量, 而

$S(t) = \dot{d}(t) + \lambda \tilde{d}(t)$ 称为滑动表面,

$$\text{sgn}(f_i(t)) = \begin{cases} 1, & f_i(t) > 0; \\ 0, & f_i(t) = 0; \\ -1, & f_i(t) < 0. \end{cases}$$

考虑系统内部参数变化, 变结构规律可定义为:

$$U(t) = U_n(t) + U_i(t), \quad (5)$$

式中: $U_n(t) = W(t)\Theta_d(t)$;

$U_i(t) = -\alpha \dot{d}(t) - \beta \tilde{d}(t)$, 而 α 和 β 是比例微分 (proportion differentiation, 简称 PD) 控制器 $U_i(t)$ 的 2 个正的比例常数。

将式 (5) 代入式 (2) 可得

$$\tilde{A}_1 \ddot{d}(t) + \tilde{B}_1 \dot{d}(t) + C_1 F_L = W(t)\Theta_d(t) - \alpha \dot{d}(t) - \beta \tilde{d}(t), \quad (6)$$

用式 (6) 减去式 (3) 就能获得误差动态方程为:

$$\tilde{A}_1 \dot{S} + \tilde{B}_1 S + \alpha \dot{d}(t) + \beta \tilde{d}(t) = W(t)(\Theta_d(t) - \Theta). \quad (7)$$

据式 (7) 和式 (4) 得跟踪误差 $\tilde{d}(t)$ 和 $\dot{d}(t)$ 可渐近地收敛至 0。从另一方面看, 保守的控制算法设计会使颤动问题更严重, 因此, 文献 [5] 提出在自适应变结

构控制器中利用自适应规律来估计不确定的边界。

由式(5)的传统算法可得自适应控制规律,并定义为:

$$\dot{\hat{\theta}}_A(t) = \dot{\theta}_A(t) = -\Gamma_A F(t) W^T(t) S(t), \quad (8)$$

式中: $\hat{\theta}_A(t) = \theta_A(t) + \bar{\theta}$ 和 $\Gamma_A = \text{diag}[\gamma a_1 \ \gamma a_2 \ \gamma a_3]$ 是正定矩阵。

此外,由下式给出神经网络的变结构规律为:

$$\theta_d(t) = F(t) \theta_A(t). \quad (9)$$

运用式(9)和式(8)给出的规律,由式(7)得跟踪误差 $\tilde{d}(t)$ 和 $\dot{\tilde{d}}(t)$ 可渐近地收敛至0,这在参考文献[5]中可找到详细证明。

3 应用 RFNN 的变结构控制器

3.1 RFNN 的控制原理

尽管在变结构自适应(variable structure adaptive, 简称 VSA) 控制器中,使用简单的自适应算法能估计不确定边界,但由于收敛速度缓慢,常使系统响应缓慢。故本节提出 RFNN 控制,以便于估计大量的不确定性。使用 RFNN 的变结构控制器给出了比 VSA 控制算法更好的控制性能,降低了控制力中的颤动现象。

为了应用 RFNN 获得变结构控制器,将式(2)重写如下:

$$U(t) = \bar{A}_1 \ddot{d}(t) + \bar{B}_1 \dot{d}(t) + (\Delta \bar{A}_1 \ddot{d}(t) + \Delta \bar{B}_1 \dot{d}(t) + C_1 F_L) = \bar{A}_1 \ddot{d}(t) + \bar{B}_1 \dot{d}(t) + \gamma, \quad (10)$$

式中: $\gamma = \Delta \bar{A}_1 \ddot{d}(t) + \Delta \bar{B}_1 \dot{d}(t) + C_1 F_L$ 是由系统参数 \bar{M}, \bar{D} 和外面负载扰动 F_L 和 $1/\bar{K}_F$ 引入的大量不确定性。

根据式(10),把参考轨迹方程改写为:

$$\bar{A}_1 (\ddot{d}_d(t) - \lambda \dot{d}(t)) + \bar{B}_1 (\dot{d}_d(t) - \lambda \tilde{d}(t)) + \gamma \triangleq W_A(t) \theta_A,$$

式中: $\theta_A = [\bar{A} \ \bar{B}_1 \ \gamma]^T$;

$$W_A(t) = \begin{bmatrix} \ddot{d}_d(t) - \lambda \dot{d}(t) & \dot{d}_d(t) - \lambda \tilde{d}(t) & 1 \\ w_{A1}(t) & w_{A2}(t) & 1 \end{bmatrix} \triangleq$$

基于 RFNN 的变结构控制器示于图2。

图2中 RFNN 通过实时估计大量的不确定性而获得新矢量 $\hat{\theta}_{AV} = [\bar{A}_1 \ \bar{B}_1 \ \hat{\gamma}]^T$, $\hat{\gamma}$ 是 γ 的估计参数,则使用 RFNN 的变结构规律定义为:

$$\theta_{AV}(t) = -F_1(t) \theta_{AV},$$

式中:

$$F_1(t) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(f_{A1}(t)) & 0 & 0 \\ 0 & \text{sgn}(f_{A2}(t)) & 0 \\ 0 & 0 & \text{sgn}(S(t)) \end{bmatrix},$$

$$f_{Ai}(t) = W_{Ai}(t) S(t), \quad i=1,2,$$

$$\text{sgn}(f_{Ai}(t)) = \begin{cases} 1, & f_{Ai}(t) > 0; \\ 0, & f_{Ai}(t) = 0; \\ -1, & f_{Ai}(t) < 0. \end{cases}$$

本文提出的变结构控制规律设计为^[4-6]:

$$U(t) = U_A(t) + U_i(t),$$

式中: $U_A(t) = W_A(t) \theta_{AV}(t)$ 。

RFNN 的输入为 $S(t)$ 和 $\hat{\gamma}$ 的延迟测量及其导数, RFNN 的输出为 $\hat{\gamma}$ 。

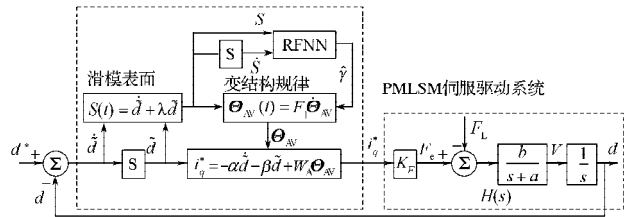


图2 运用 RFNN 变结构控制系统的方块图

Fig. 2 Block diagram of variable structure control system based on RFNN

3.2 RFNN 的结构描述

示于图3的4层网络,它包含1个输入层(i层)、隶属度层(j层)、规则层(k层)和输出层(o层),采用 RFNN 实现,下面介绍每层信号的传导函数。

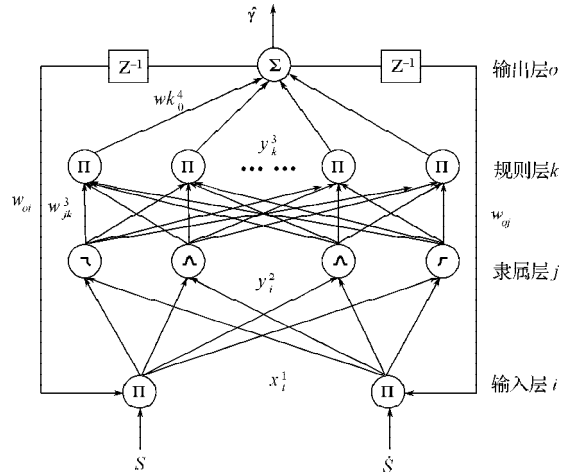


图3 RFNN 的结构

Fig. 3 The structure of RFNN

i 层 在输入层的每个结点 $i(i=1,2)$, 网络的输入和输出表示为:

$$\begin{cases} net_i^1(N) = \prod x_i^1(N) w_{oi} \hat{\gamma}(N-1), \\ y_i^1(N) = f_i^1(net_i^1(N)) = net_i^1(N), \end{cases}$$

式中: $net_i^1(N)$ 为输入层的输入, N 为迭代次数;

$$x_1^1 = S(t) \text{ 和 } x_2^1 = \dot{S}(t);$$

w_{oi} 为输出层中单元神经元的递归权;

$y_i^1(N)$ 为输入层的输出;

\hat{y} 为RFNN的输出。

j 层 这一层的每个结点完成1个隶属度函数。采用高斯函数作为隶属度函数,对于第 $j(j=1,2,\dots,n)$ 个结点有

$$\begin{cases} net_j^2(N) = -(y_i^1 - m_{ij})^2 / (\sigma_{ij})^2, \\ y_j^2(N) = f_j^2(net_j^2(N)) = \exp(ent_j^2(N)), \end{cases}$$

式中: m_{ij} 和 σ_{ij} 分别为第 i 个输入语言变量 y_i^1 到第2层的结点第 j 项的高斯函数的平均值和标准偏差;

$n=6$ 为相对于输入结点的语言变量总数。

k 层 用 Π 表示 k 层的每个结点, Π 是输入和输出信号的乘积,对于第 $k(k=1,2,\dots,l)$ 个规则的结点有

$$\begin{cases} net_k^3(N) = \prod_j w_{jk}^3 y_j^2(N), \\ y_k^3(N) = f_k^3(net_k^3(N)) = net_k^3(N), \end{cases}$$

式中: y_j^2 表示第 j 个输入到第3层的结点;

w_{jk}^3 是隶属度层和规则层之间的权;

$l=(n/i)^i=9$ 是用来完成规则连接的规则数,条件是每个输入结点有相同的语言变量。

o 层 这层的单个结点 $o(o=1)$ 用 Σ 来标记, Σ 表示所有输入信号的和的全部输出,即

$$\begin{cases} net_o^4(N) = \sum_k w_{ko}^4 y_k^3(N), \\ \gamma(N) = f_o^4(net_o^4(N)) = net_o^4(N), \end{cases}$$

式中: w_{ko}^4 为相连的权,是与第 k 个规则相关的输出作用强度;

y_k^3 表示输入到第4层结点的第 k 个输入。

RFNN通过更新 w_{ko}^4, w_{oi}, m_{ij} 和 σ_{ij} 进行在线训练,有关RFNN在线学习的详细推导因篇幅有限,故省略。

4 仿真结果

为了检验本文提出的控制系统的有效性,考虑结构参数变化和外来干扰2种情况进行仿真。

情况1

$$H_1(s) = \frac{1}{0.3762s + 5.2982}, M = 3\bar{M}, F_L = 0 \text{ N}.$$

情况2

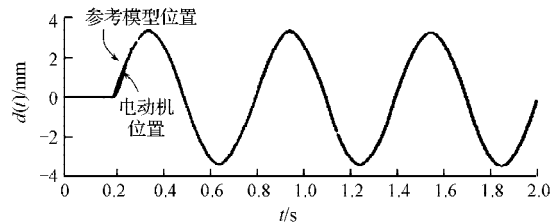
$$H_2(s) = \frac{1}{0.1254s + 5.2982}, M = \bar{M}, F_L = 10 \text{ N}, t \leq 1 \text{ s}.$$

用Matlab软件包来实现仿真,目的是在输入正弦和三角形参考轨迹后,控制电动机周期性移动5 mm, VSA控制器的参数选择如下:

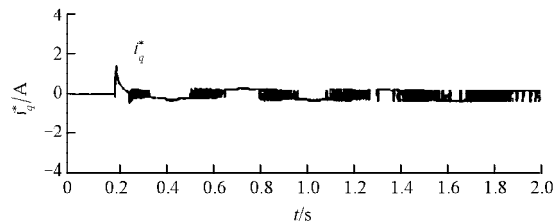
$$\lambda = 30, \alpha = 1.5, \Gamma_A = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

采用极点配置法选择滑动表面的 λ 值,且在仿真和实验2种不确定性和 $\beta = \alpha\lambda$ 的情况下,合理选择PD控制器的 α 值,以得到良好的命令跟踪响应结果。此外,采用实验误差的方法来选择增益矩阵 Γ_A ,从而获得适当的适应机构。为了表示使用小规则集的RFNN控制器的有效性,把每个输入信号相关的高斯函数的模糊集分为3个隶属度函数,即 N (负)、 Z (零)和 P (正),那么,对于2个输入就形成9种语言规则,采用面积中心法进行模糊处理,从而获得1个输出。如上所述,RFNN就分别有2个输入、6个隶属度、9个规则和1个神经元输出,与传统算法的自适应控制规律相比较,使用RFNN变结构控制器可使控制性能得到改善。如果采用预设值进行仿真和实验训练过程,用来选取相连的权和隶属函数,这样每个训练过程都是迭代学习过程,从而使得RFNN的最初参数能加速收敛过程。

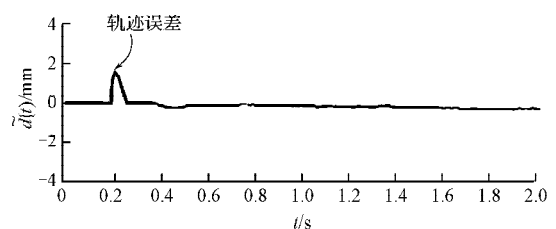
现在,主要对如图2所示应用RFNN的变结构控制器进行仿真。在情况1和2中,在输入周期正弦信号和三角信号的条件,其仿真的输出结果如图4所示。从仿真结果来看,使用RFNN变结构控制器就能获得鲁棒控制的特征并使跟踪响应得到改善,因此,使得RFNN的变结构控制器的控制力和颤动现象,由于大量不确定性的在线调节而降低了,此外,与VSA控制器相比较,位置跟踪误差也较大地降低了。



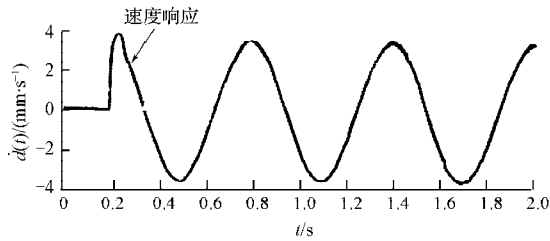
a) 情况1的位置跟踪响应



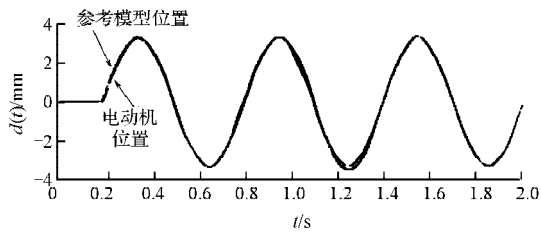
b) 情况1的控制力



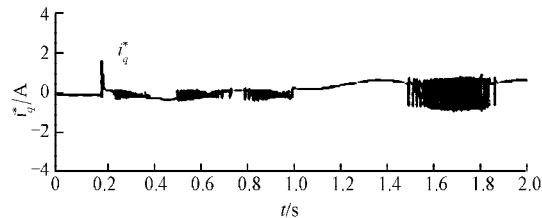
c) 情况1的位置跟踪误差



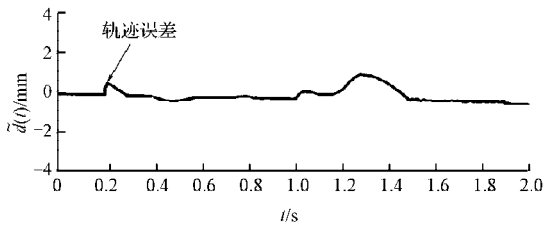
d) 情况 1 的速度响应



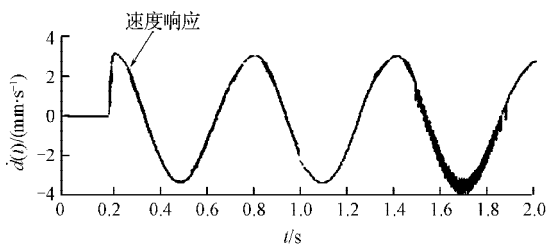
e) 情况 2 的位置跟踪响应



f) 情况 2 的控制力



g) 情况 2 的位置跟踪误差



h) 情况 2 的速度响应

图4 变结构控制器仿真响应曲线

Fig. 4 Simulated responses curve of the variable structure controller

5 结语

本文研究结果证明,采用变结构自适应算法和 RFNN 变结构控制器对 PMLSM 伺服电动机的位置进行控制,能获得较好的跟踪效应。在设计变结构自适应控制器时,发现由其算法得出的跟踪误差收敛速度缓慢,导致位置和速度跟踪响应迟缓,在仿真中就出现了控制力颤抖现象严重的问题,因此,本文中提出应用 RFNN 变结构控制器。使用 RFNN 变结构控制器能成功地估算变结构控制规则中的大量不确定性,从而大大地降低了控制力颤动现象。仿真结果证明,应用 RFNN 变结构控制器具有较好的鲁棒性和可行性。

参考文献:

- [1] 陈兴国, 钟定铭, 王力, 等. 自适应模糊滑模控制裹包机 PMSM 交流伺服系统[J]. 包装工程, 2005, 26(6): 58-60.
Chen Xingguo, Zhong Dingming, Wang Li, et al. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for the PMSM Ac Servo System of Binding Machine[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(6): 58-60.
- [2] 陈兴国, 钟定铭, 张学毅. 递归网络自适应控制裹包机凸轮差动器驱动系统[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 10-13.
Chen Xingguo, Zhong Dingming, Zhang Xueyi. Adaptive Control Using a Recurrent Network for the Can Differential Device Servo System of Binding Machine[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 10-13.
- [3] Boldea I, Nasar S A. Linear Electric Actuators and Generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 712-717.
- [4] Lin C H, Chou W D, Lin F J. Adaptive Hybrid Control Using a Recurrent Neural Network for a Linear Synchronous Motor Servo-Drive System[J]. Control Theory Application, 2001, 148(2): 156-168.
- [5] Lin F J, Shyn K K, Lin Y S. Variable Structure Adaptive Control for PM Synchronous Servo Motor Drive[J]. Electric Power Applications, 1999, 146(2): 173-185.
- [6] Astrom Karl Johan, Wittenmark Bjorn. Adaptive Control[M]. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc, 1994.

(责任编辑: 李玉珍)