

基于 RBF 神经网络补偿的直线伺服系统滑模鲁棒跟踪控制

孙宜标, 郭庆鼎

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 永磁直线伺服系统具有高速、高响应和直接驱动等优点, 但负载扰动、端部效应、非线性摩擦及系统参数变化会降低系统的伺服性能. 为了在保证系统的跟踪性能的基础上, 消除上述不确定性因素的影响, 本文提出一种将变结构控制(VSC)和径向基函数神经网络(RBFNN)相结合的鲁棒跟踪控制策略. 变结构控制具有快速响应, 对不确定因素的不变性的优点. 但是其“抖振”现象将影响直线伺服系统的平稳性和定位精度. 采用径向基函数神经网络来模拟端部效应、参数变化、摩擦和外部负载等不确定因素, 引入带死区的目标函数以缩短学习过程. 通过 RBFNN 的补偿控制来减弱“抖振”输入的程度, 进一步提高系统的稳态精度. 仿真结果表明, 该方案对直线伺服系统不确定性有很强的鲁棒性, 同时, 系统具有较好的跟踪性能, 大大提高了直接驱动直线伺服系统的鲁棒跟踪精度.

关键词: 永磁直线同步电机; 直接驱动; 端部效应; 滑模变结构控制; 抖振; 径向基函数神经网络

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Sliding mode robust tracking control for linear servo system based on RBF neural networks compensation

SUN Yi-biao, GUO Qing-ding

(Electric Engineering Institute, Shenyang University of Technology, Liaoning Shenyang 110023, China)

Abstract: Permanent-magnet linear servo system has the merits of high speed, high response, and direct drive etc., but the load disturbance, end effects, nonlinear friction, and the change of system parameters reduce the servo performance of the system. To eliminate the influence of the uncertainties mentioned above for ensuring tracking capability, in this paper a robust tracking control strategy is proposed, combining the variable structure control (VSC) with the radial basis function neuron network (RBFNN). The VSC has the merits of high response and the invariability to uncertainties, but its "chattering" phenomenon negatively affects the placidity and positioning precision of the linear servo system. An RBFNN is applied to model the uncertainties caused by end effects, parameter variations, friction, and external load etc., and an objective function with dead zone is introduced to shorten the learning process. The compensation control based on RBFNN attenuates the chattering level of the control input and improves the static precision of the system. The simulation results show that this control scheme not only has a strong robustness to uncertainties of the linear system, but also has a good tracking performance. In fact, the control greatly improves the robust tracking precision of the direct drive linear servo system.

Key words: permanent-magnet linear synchronization motor; direct-drive; end effects; sliding mode variable structure control; chattering; radial basis function neuron network

1 引言(Introduction)

交流永磁直线伺服系统省掉了机械速度变换机构, 将负载直接与永磁直线同步电动机(PMLSM)的动子相连, 消除了机械速度变换机构所带来的一些不良影响, 如摩擦、机械后冲、弹性变形等, 在高精度、微进给伺服系统应用中具有非常大的优势^[1]. 但是, 由于直接驱动负载, 负载的变化和外部扰动将直接影响直线伺服系统的性能. 而且, 直线电机的端部效应、齿槽效应和永磁体磁链谐波等将产生推力纹

波、系统参数(动子质量、粘滞摩擦系数等)的变化、摩擦阻力的非线性变化以及状态的观测噪声等都会降低系统的伺服性能^[2]. 为了在保证系统的跟踪性能的基础上, 消除上述扰动因素的影响, 本文引入一种将非线性变结构控制(VSC)和径向基函数神经网络(RBFNN)相结合的鲁棒控制方法.

变结构控制具有快速响应, 对不确定因素的不变性, 并且易于实现等优点. 但是变结构控制中用于处理不确定因素的切换控制将使系统产生“抖振”现

象,并且“抖振”的幅度与系统参数变化的范围及外部扰动的幅值成比例关系^[3]。“抖振”将影响直线伺服系统的平稳性和定位精度,增加能量损耗等。常见的削弱“抖振”的方法是用连续的饱和非线性控制代替切换控制,使不连续切换控制光滑化。然而,系统的稳定性只有在临界层的外面才能得到保证,且跟踪误差与临界层的宽度有关^[4,5]。这种方法在削弱“抖振”的同时也破坏了滑模变结构控制的抗摄动性,且不能保证临界层内系统的稳定性^[5]。文献[2]曾提出一种基于线性扰动观测器的补偿控制方法以削弱“抖振”。但是,PMLSM的端部效应力及摩擦力等不确定扰动往往是时变非线性的,所以其补偿效果不尽如人意。

为了削弱“抖振”对直线伺服系统的影响,本文引入径向基函数神经网络(RBFNN)来模拟由端部效应、参数变化、摩擦和外部负载所引起的不确定因素。因为RBFNN的连接权是线性的,而网络输出是非线性的。因而,整个系统易于稳定,学习算法简单,且加快了连接权的收敛速度^[6]。本文还引入带死区的目标函数以缩短学习过程。通过RBFNN的补偿控制,在保证系统强鲁棒性的同时,进一步提高系统的稳态精度。

2 PMLSM的数学模型(Mode of PMLSM)

交流永磁直线同步电动机是直接将交流电能转换为直线运动的推力装置。直线电机及交流直线伺服系统的结构详见文献[2]。由于PMLSM的定子及动子的两端开断而产生端部效应,它将产生推力波动,从而影响伺服系统的性能。图1是采用AMETEX公司DFGS100测力仪测绘的空载端部效应力曲线。该测试仪精度为 $\pm 0.15\%$,取样速率5000次/s,图中 F_d 为端部效应力, s 为动子的位移。其中低频分量为电机空载端部效应波动力,而高频分量则为齿槽效应波动力,它可以通过短初级斜槽等措施加以削弱或消除。端部效应力将严重影响直线伺服系统的运行性能,使机床加工光洁度较差,重复定位精度下降。

由图1可知,PMLSM的端部效应力可近似简化为位移的正弦函数。其简化数学模型为

$$F_d = F_{dm} \cos \left(\frac{s}{\tau} 2\pi + \theta_0 \right). \quad (1)$$

式中: F_{dm} 为端部效应力波动的幅值, τ 为极距, s 为动子的直线位移, θ_0 为初始相位电角度^[7]。

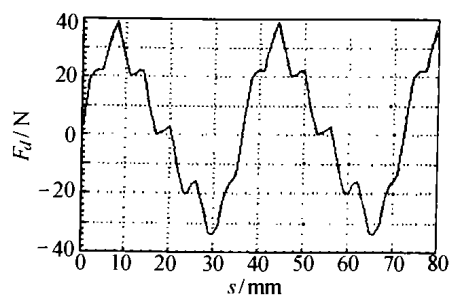


图1 空载时端部效应力

Fig. 1 End effect force without load

当仅考虑基波分量,可以使用 $d-q$ 轴模型。PMLSM电压方程及磁链方程为

$$u_d = R_s i_d + p \lambda_d - v \lambda_q, \quad (2)$$

$$u_q = R_s i_q + p \lambda_q + v \lambda_d, \quad (3)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{PM1}, \quad (4)$$

$$\lambda_q = L_q i_q. \quad (5)$$

电磁推力表达式为

$$F_e = \frac{2\pi}{\tau} [\lambda_{PM1} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \quad (6)$$

对PMLSM进行矢量控制,即要求动子电流矢量与定子永磁体磁场在空间上正交。电流内环采用励磁分量 $i_d = 0$ 的控制策略,则PMLSM的运动方程为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM1} i_q = K_f i_q = M \frac{dv}{dt} + Bv + F_d + F_l, \quad (7)$$

$$s = \int v dt. \quad (8)$$

以上各式中: $u_d, u_q, i_d, i_q, L_d, L_q, \lambda_d, \lambda_q$ 分别为 d, q 轴动子电压、电流、电感、磁链; R_s 为动子电阻; λ_{PM1} 为定子永磁体产生的励磁磁链; s 为动子线位移; v 为动子速度; B 为粘滞摩擦系数; τ 为极距; M 为动子和动子所带动负载的总质量; K_f 为电磁推力系数; F_e 为电磁推力; F_l 为负载阻力; F_d 为端部效应力。

定义状态变量

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T = [s(t) \ \dot{s}(t) \ \ddot{s}(t)]^T,$$

则得PMLSM的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = -a(t)x_2(t) + b(t)u(t) - d(t). \end{cases} \quad (9)$$

其中: $a(t) = B/M, b(t) = K_f/M$ 为系统时变参数; $d(t) = (F_l + F_d)/M$ 为系统的时变扰动; $u = i_q$ 为控制输入量。基于RBFNN滑模变结构控制的直线伺服系统原理框图如图2所示。

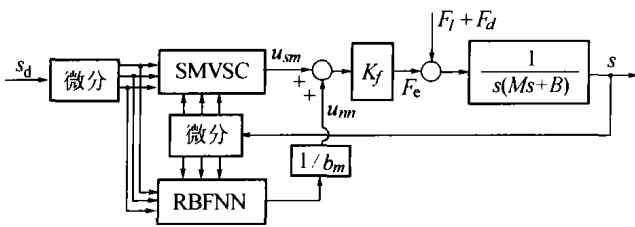


图2 基于RBFNN滑模变结构控制的直线伺服系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of PMLSM servo system with SMVSC based on RBFNN

本文的设计目标是:系统受较大的不确定因素影响(来自于 $a(t)$, $b(t)$, $d(t)$)时,没有“抖振”控制输入,实际位移 s 能尽可能近的跟踪理想位移 s_d .

3 滑模变结构控制器的设计(Design of sliding mode variable structure controller)

滑模变结构控制的设计分为两部分:第一部分为选择稳定且具有理想动态特性的滑模切换超平面;第二部分为确定滑模控制律,使系统的轨线在有限时间内到达滑模切换超平面附近,从而保证其沿滑模切换超平面滑向稳定点.

假设 1

- 1) $\{\ddot{s}_d(t), \dot{s}_d(t), s_d(t), s(t)\}$ 已知有界,且连续;
- 2) 状态 $x(t)$ 可获得;
- 3) 时变参数及扰动有界,即

$$a(t) = a_n + \Delta a(t), |\Delta a(t)| \leq \alpha(t) \quad \forall t,$$

$$b(t) = b_n + \Delta b(t), |\Delta b(t)| \leq \beta(t) \quad \forall t,$$

$$|d(t)| < \gamma(t) \quad \forall t.$$

其中: a_n, b_n 为系统的额定参数, $\Delta a(t), \Delta b(t)$ 为系统参数的不确定部分, $\gamma(t)$ 为负载扰动的上界.

设变量 $e(t) = s_d - s(t)$, 为了消除变结构系统的稳态误差,在切换面函数 $\sigma(t)$ 中引入积分环节,设计滑模切换超平面方程为

$$\sigma(t) = \ddot{e}(t) + c_1 \dot{e}(t) + c_2 e(t) + c_3 \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (10)$$

适当选择 $c_i (1 \leq i \leq 3)$, 从而 $\sigma(t) = 0$ 的动力学特性是稳定的并有理想的特征值.

首先,将滑模切换超平面的动力学方程(10)改写为

$$\dot{E}(t) = CE(t) + D\sigma(t). \quad (11)$$

其中

$$E(t) = \begin{bmatrix} \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau \\ e(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -c_3 & -c_2 & -c_1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

式(11)的解如下:

$$E(t) = \exp[C(t-t_0)]E(t_0) + \int_{t_0}^t \exp[C(t-\tau)]D\sigma(\tau)d\tau, t \geq t_0. \quad (13)$$

定理 1 如果存在两个正常数 k_1, k_2 , 使不等式

$$\begin{cases} \|\exp[C(t-t_0)]\| \leq k_1 \exp[-k_2(t-t_0)], \\ \forall t \geq t_0 \geq 0, k_2 = -\max_{1 \leq i \leq 3} \operatorname{Re} \{\lambda_i[C]\} \end{cases} \quad (14)$$

成立,则滑模切换超平面动力学方程(11)是稳定的.

定理 2 如果滑模切换超平面动力学方程满足不等式 $|\sigma(t)| < \delta \|E(t)\| (t \geq t_0, 0 < \delta < k_2/k_1)$ 初始条件 $E(t_0)$ 有界,那么,当 $t \geq t_0$ 时, $e(t)$ 以 $(k_2 - \delta k_1)$ 的速度趋于零^[5].

由凯莱-哈密顿定理可知,矩阵 $\exp[C(t-t_0)]$ 可表示为 3×3 的矩阵.如果 C 阵的极点在平面 S 的左半平面,且越向左, δ 的值越小,则由式(14)及 $0 < \delta < k_2/k_1$ 即可以确定 k_1 和 k_2 .

滑模变结构控制律采用等效控制法,控制输入的结构为

$$u_{sm}(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t). \quad (15)$$

其中: u_{eq} 为滑模等效控制部分,控制 PMLSM 系统的确定部分;而切换控制 u_s 则是控制系统的不确定部分,以保证系统的鲁棒性.根据滑模等效控制条件 $\sigma(t) = 0$ 和 $d\sigma(t)/dt = 0$, 由式(9)、(10)和(15)可推导出等效控制

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{b_n} \{ \ddot{s}_d(t) + a_n x_2(t) + c_1 [\ddot{s}_d(t) - x_3(t)] + c_2 [\dot{s}_d(t) - x_2(t)] + c_3 [s_d(t) - x_1(t)] \}. \quad (16)$$

切换控制设计为

$$u_{sw}(t) = K(x, t) \operatorname{sgn}(\sigma). \quad (17)$$

其中

$$K(x, t) = [a(t) | x_2(t) | + \beta(t) | u_{eq}(t) | + \gamma(t)] / [b_n - \beta(t)]. \quad (18)$$

由假设 1 可得系统状态 $x_1(t)$ 近似跟随给定位移 $s_d(t)$, 并且滑模控制输入量 $u_{sm}(t)$ 有界.

4 基于 RBFNN 的补偿控制 (Compensation control based on RBFNN)

实际系统中,滑模切换控制的增益 $K(x, t)$ 与系统的不确定因素 $(\alpha(t) | x_2(t) |$ 或 $\beta(t) | u_{eq}(t) |)$ 及不确定动态负载 $(d(t))$ 的上界成比例关系.如果上界很大,则过大的切换控制增益 $K(x, t)$ 将引起

“抖振”控制输入.大幅度的“抖振”将影响系统的性能,甚至会导致系统不稳定.导致“抖振”的直接原因是切换控制的不连续性,而根本原因是系统的各种不确定因素及不确定扰动.因此,本文采用 RBFNN 来对系统的不确定性因素及扰动进行学习建模,并进行实时补偿控制.从而减小切换控制的增益,消除大幅“抖振”对系统的影响,改善系统的性能. RBFNN 的结构如图 3 所示.输出连接权是线性的.

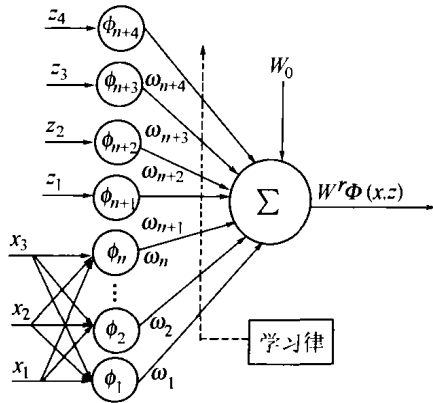


图 3 径向基函数神经网络 (RBFNN) 的结构图

Fig. 3 Block diagram of RBFNN

系统的各种不确定因素及不确定扰动用下面的 RBF 神经网络加以近似:

$$\Delta a_i(t)x_i(t) - \Delta b(t)u_{eq}(t) + d(t) = W^T \Phi(x, z) \quad \forall t. \quad (19)$$

其中: 向量 $x(t)$ 和 $z(t) = [s_d(t) \quad \dot{s}_d(t) \quad \ddot{s}_d(t) \quad \dots \quad s_d^{(n)}(t)]^T \in \Omega(x, z)$, $\Omega(x, z)$ 是 $\in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^4$ 的一个闭集, $\Phi(x, z)$ 为径向基函数 (RBF) 向量:

$$\begin{cases} \Phi(x, z) = [1 \quad \phi_1(x) \cdots \phi_n(x) \quad \phi_{n+1}(z) \cdots \phi_{n+4}(z)]^T, \\ \phi_i(x) = \exp[-\|x(t) - \theta_i\|^2 / \delta_i^2] \quad (i = 1, \dots, n), \\ \phi_{n+1}(z) = s_d(t), \quad \phi_{n+2}(z) = \dot{s}_d(t), \\ \phi_{n+3}(z) = \ddot{s}_d(t), \quad \phi_{n+4}(z) = s_d^{(n)}(t). \end{cases} \quad (20)$$

其中: $\phi_i(x)$ 为高斯函数, θ_i 为 RBF 的中心, δ_i 为中心点间宽度; $W \in \mathbb{R}^{n+5}$ 为线性连接权向量.

由此可得 RBF 神经网络补偿控制为

$$u_{nn}(t) = W^T \Phi(x, z) / b_n. \quad (21)$$

整个系统的控制输入为

$$u(t) = u_{sm}(t) + u_{nn}(t). \quad (22)$$

相轨迹穿过滑模超平面 ($\sigma(x) = 0$) 时的速度过大将导致较大幅值的抖振.因此,在相点接近滑模超平面时,应尽量减小切换控制的幅值,以减小相点穿越滑模超平面的速度.而在离滑模超平面较远的地方则应保持较大的切换控制的幅值,以保证系统

的快速性.由于滑模控制的抖振与切换函数 σ 及其导数 $\dot{\sigma}$ 有密切关系: σ 与状态点距滑模超平面 $\sigma = 0$ 的距离成正比;而 $\dot{\sigma}$ 与状态点趋向滑模超平面的速度成正比^[1].当 $\sigma \cdot \dot{\sigma} = 0$ 时,系统状态保持在滑模超平面上滑动,没有抖振现象.因此,本着削弱抖振的原则,应沿着使 $|\sigma \cdot \dot{\sigma}|$ 的值减小的方向调整权值 W .为了缩短学习过程,在目标函数中引入死区环节.由此选取系统误差目标函数为

$$\xi(t) = \begin{cases} |\sigma(t)\dot{\sigma}(t)|, & |\sigma(t)\dot{\sigma}(t)| > \varepsilon, \\ 0, & |\sigma(t)\dot{\sigma}(t)| \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\varepsilon > 0$ 为常数.当工作点在滑模超平面的邻域内时,学习算法终止;否则,学习继续进行.采用梯度下降法来对权值进行调整:

$$\omega_j(k+1) = \omega_j(k) - \eta_j \nabla_{\omega_j} \xi(k) \quad (j = 1, \dots, n+4). \quad (24)$$

其中, η_j 是学习率为正常量.式 (23) 中的修正量为

$$\nabla_{\omega_j} \xi(k) = \frac{\partial \sigma(k) \dot{\sigma}(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial (u_{sm}(k) + u_{nn}(k))}{\partial \omega_j(k)}. \quad (25)$$

由于控制输入量 u 中的 u_{eq} 和 u_{sw} 与权值 $\omega_j(k)$ 无关,所以, $\partial u_{sm}(k) / \partial \omega_j(k) = 0$.由式 (9)、(11) 可得

$$\frac{\partial \sigma(k) \dot{\sigma}(k)}{\partial u(k)} = \sigma(k) \frac{\partial \dot{\sigma}(k)}{\partial u(k)} = -b_n \sigma(k), \quad (26)$$

所以权值 $\omega_j(k)$ 的学习律为

$$\begin{aligned} \omega_j(k+1) &= \omega_j(k) - \eta_j b_n \sigma(k) \frac{\partial u_{nn}(k)}{\partial \omega_j(k)} = \\ &= \omega_j(k) - \eta_j \sigma(k) \phi_j(x, z). \end{aligned} \quad (27)$$

由于 PMLSM 的阻力扰动 F_l 、端部效应力 F_d 的波动及系统参数的变化相对电气动态过程比较缓慢,故完全可以用 RBFNN 的学习能力对其进行实时补偿控制,从而消除“抖振”控制输入的发生.

5 仿真结果及分析 (Simulation results and analysis)

设交流永磁直线伺服电机的额定参数为

$$M_n = 11.0 \text{ kg}, \quad B_n = 2.0 \text{ N} \cdot \text{s/m},$$

$$K_{fn} = 25 \text{ N/A}, \quad F_{en} = 200 \text{ N}, \quad v_n = 2.0 \text{ m/s}.$$

采用 MATLAB6.1 进行系统仿真.为了方便比较还对传统滑模控制进行了仿真.系统的期望位移轨迹为 $s_d(t) = 1 \sin(2\pi t) \text{ m}$.假设该直线伺服系统的参数变化范围为 $|\Delta a(t)| \leq |a_n(t)| = \alpha(t)$; 不确定控制增益上界为 $|\Delta b(t)| \leq 0.5 |b_n(t)| = \beta(t)$; 外部负载扰动的上界为且 $\gamma(t) = |d(t)|$.令 $\Delta a(t) = \alpha(t)$, 且 $\Delta b(t) = 0.5\beta(t)$; 即参数变化的

偏移量为 100% 和 50%, 端部效应力近似为 $F_d = 40\sin(4s)N$ (s 为实际位移). 控制参数为

$$\eta = 0.25, \gamma_1 = 100, \bar{\alpha} = 5.$$

系统状态和 RBFNN 的连接权的初始值为 $x(0) = [0 \ 0 \ 0]^T$ 和 $W(0) = 0$. 稳定的滑模切换超平面的系数设计为 $c_1 = 90, c_2 = 2600, c_3 = 24000$ (即极点为 $-20, -30$ 和 -40). 闭子集是

$$\Omega(x, z) = \{x(t): |x_1(t)| \leq 2, |x_2(t)| \leq 4, |x_3(t)| \leq 16, \|z(t)\| \leq 30\}.$$

神经网络中心点是 $\theta_j = [\theta_{j1} \ \theta_{j2} \ \theta_{j3}] (1 \leq j \leq n \leq 100)$, 且它的分量 $\theta_{ji} (1 \leq i \leq 3) \in [-1 - 0.5 \ 0 \ 0.5 \ 1]$. 神经网络中心点宽度是 $\delta_i = 0.5 (1 \leq i \leq 100)$, 设未知连接权的上界为 $W_{\max} = 4$ 且 α 的值指定为 250.

传统 SMVSC 及 BRFNN-SMVSC 的系统位移跟踪特性曲线分别如图 4、图 5 所示. 图中①、②分别为理想和实际位移特性曲线.

比较图 4 和图 5 可知: 在系统存在较大不确定因素的情况下, 传统 SMVSC 的跟踪性能会变差, 并发生“抖振”现象, 甚至会导致系统输出响应发生振荡. 而本文所提出的 BRFNN-SMVSC 方案不仅具有稳定的跟踪准确性, 而且具有满意的瞬态性能. 这是由于 BRFNN 抓住了不确定因素的主要特征, 来对不确定因素进行学习, 且连接权不需离线训练.

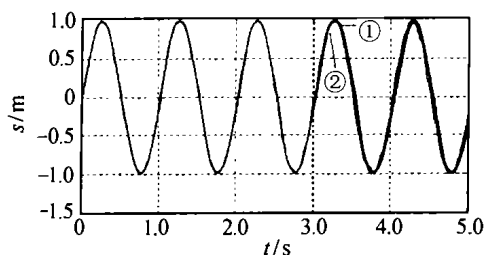


图 4 传统的 SMVSC 的系统位移跟踪特性曲线
Fig. 4 Curve of displacement-tracking characteristic of system with tradition SMVSC

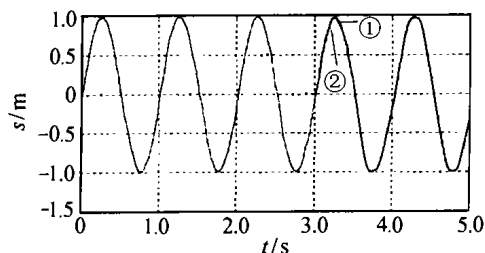


图 5 BRFNN-SMVSC 的系统位移跟踪特性曲线
Fig. 5 Curve of displacement-tracking characteristic of system with BRFNN-SMVSC

6 结论 (Conclusion)

在变结构控制 (VSC) 中, “抖振” 控制输入产生的原因是切换控制, 这种切换控制是处理直线伺服系统中, 由端部效应、参数变化、摩擦和外部负载等产生的不确定因素. 本文采用 RBFNN 来模拟这些不确定因素并对其进行实时补偿控制, 从而基本消除了“抖振” 控制输入对直线伺服系统的影响. RBFNN 的连接权不用预先估计 (如离线训练), 初始权设置为零 (即对有关 VSC 的附加不确定因素不用补偿). 仿真结果表明该控制策略在保证鲁棒性的同时, 使系统获得较好的跟踪效果.

参考文献 (References):

- [1] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等. 直线交流伺服系统的精密控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
(GUO Qingding, WANG Chengyuan, ZHOU Meiwen, et al. *Precision Control of Linear AC Servo System* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2000.)
- [2] 孙宜标, 郭庆鼎, 石丽梅. 基于推力观测器的直线式交流伺服系统滑模变结构控制 [J]. 电工技术学报, 1998, 13(2): 1-5.
(SUN Yibiao, GUO Qingding, SHI Limei. Sliding mode variable structure control based on thrust observer for AC linear servo system [J]. *Trans on China Electrotechnical Society*, 1998, 13(2): 1-5.)
- [3] 王丰尧. 滑模变结构控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
(WANG Fengyao. *Sliding Mode Variable Structure Control* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1995.)
- [4] KACHROO P, TOMIZUKA M. Chattering reduction and error convergence in the sliding mode control of a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 32(7): 1063-1068.
- [5] HWANG C L. Sliding mode control using time-varying switching gain and boundary layer for electro hydraulic position and differential pressure control [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 1996, 143(4): 325-332.
- [6] 王永骥, 涂健. 神经网络控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
(WANG Yongji, TU Jian. *Neural Network Control* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1998.)
- [7] 李庆雷, 王先逵. 永磁交流同步直线电机位置伺服控制系统设计 [J]. 中国机械工程, 2001, 12(5): 577-581.
(LI Qinglei, WANG Xiankui. Design of permanent-magnet AC linear synchronic motor position servo control system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2001, 12(5): 577-581.

作者简介:

孙宜标 (1970—), 男. 现为沈阳工业大学讲师, 在读博士. 主要研究方向为交流伺服系统, 滑模变结构控制, 鲁棒控制, 非线性控制及混沌理论等. 发表论文 20 余篇. E-mail: yuefei2002@hotmail.com;

郭庆鼎 (1939—), 男. 1964 年毕业于哈尔滨工业大学电机工程系, 现为沈阳工业大学电气工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为交流伺服, 数控技术, 鲁棒控制, 智能控制.