

文章编号 1004-924X(2011)07-1643-08

模糊神经网络在自适应双轴运动控制系统中的应用

陈向坚, 李 迪, 白 越, 续志军*

(中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了更好地提高工艺加工平台的精确度, 结合自适应控制与区间二型模糊神经网络理论设计了一个双轴运动控制系统。该系统通过控制两个场向永磁同步电机来定位 X-Y 双轴运动转子的位置, 从而跟踪预设的蝶形曲线。针对由区间二型模糊神经网络的有限规则产生的不可避免的逼近误差和优化的参数向量等集中不确定性因素, 设计了自适应集中不确定性估计律, 并通过在线鲁棒补偿器处理集中不确定性的值。最后, 通过 TMS320C32 数字信号处理器运行了本文提出的控制算法。实验结果验证了基于区间二型模糊神经网络设计的双轴运动控制系统的轨迹跟踪精确度较高。与一型模糊神经网络控制系统相比, 区间二型模糊神经网络控制系统具有更好的控制性能, 鲁棒性更强。

关键词: 区间二型模糊神经网络; 双轴运动控制系统; 永磁同步电机; Lyapunov 稳定性理论

中图分类号: TP183; TP273.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1643

Application of type-II fuzzy neural network to adaptive double axis motion control system

CHEN Xiang-jian, LI Di, BAI Yue, XU Zhi-jun*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn

Abstract: An adaptive double axis motion control system to improve the accuracy of processing platforms was designed by combining the adaptive technology and the interval type-II fuzzy neural network theory. The system controlled two field oriented permanent magnet synchronous motors to locate the X-Y double axis motion rotor to track the butterfly contour. Meanwhile, a robust compensator was proposed to confront the Lumped uncertainty, including the inevitable approximation error due to the finite rules of the interval type-II fuzzy neural network, optimal parameter vectors and so on. Finally, the proposed control algorithm was implemented in a TMS320C32 digital signal processor. The experimental results indicate that the butterfly contour tracking performance of the double axis motion control system is improved significantly, and the control system based on the interval type-II fuzzy neural network is more robust than that based on the type-I fuzzy neural network for different uncertainties.

Key words: interval type-II fuzzy neural network; double axis motion control system; permanent-magnet synchronous motor; Lyapunov stability theorem

收稿日期: 2010-12-13; 修订日期: 2011-02-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50905174)

1 引言

随着数字控制技术的进一步发展,现代加工技术迫切需要高性能、高精度的工艺加工机械平台。其中,双轴运动控制系统^[1]的加工机械由于采用直接驱动永磁同步电机的机械平台设计,可以在高机械转速下获得高精度的弧线而倍受研究者的关注。然而永磁同步电机由于受到缓冲环节,系统参数摄动、负载扰动等不确定因素的影响,加之同步电动机所固有的电磁耦合端非线性特性会损害系统的运行平稳性并降低定位精度,因此必须采取适当的控制技术来减小这些参数变化和外部扰动所带来的影响,使其能够应用于高速和高定位精度的场合。因此,本文采用永磁同步电机并基于模糊神经网络作为控制器来设计双轴运动控制系统。

模糊神经网络结合了模糊理论处理的不确定性以及神经网络学习的能力,而且能够逼近任意非线性和不确定性系统。然而,目前涉及的分析以及应用都是基于一型模糊神经网络^[2-6]。二型模糊集^[7-10]的概念是一型模糊集概念的扩展,是将模糊隶属函数值进行模糊化,采用二型模糊逻辑作为前期部分,神经网络作为后期部分组成的模糊神经网络。因为常规的二型模糊神经网络^[5]在由二型降型到一型时计算量特别大,所以,有人提出了区间二型模糊神经网络来简化计算量。区间二型模糊神经网络由区间二型模糊语言化过程作为前件,以三层区间神经网络作为后件来组成,从二型模糊规则的一组集合通过多层网络实现二型模糊推理系统,它具备了二型模糊系统及神经网络的优点,可以用来任意逼近非线性及不确定性系统。

本文结合自适应控制以及区间二型模糊神经网络理论设计控制器,通过控制两个永磁同步电机来设计双轴控制系统;并提出了在线鲁棒补偿器来处理集中不确定性,采用 Lyapunov 理论来验证控制系统的收敛性及稳定性。最后将此智能控制方案下载到 TMS320C32 数字处理器中,通过跟踪蝶形曲线的对比实验来验证控制系统的跟踪性能及鲁棒性。

2 双轴运动台机械建模

X-Y 转台由两个 220 V 5.0 A 475 N 的永磁同步电机构成^[3-5],单轴永磁同步电机的机械模型为:

$$\begin{cases} V_{q(x/y)} = R_{s(x/y)} i_{q(x/y)} + \dot{\lambda}_{q(x/y)} + \omega_{e(x/y)} \lambda_{q(x/y)} \\ V_{d(x/y)} = R_{s(x/y)} i_{d(x/y)} + \dot{\lambda}_{d(x/y)} - \omega_{e(x/y)} \lambda_{d(x/y)} \end{cases}, \quad (1)$$

其中, $\lambda_{q(x/y)} = L_{q(x/y)} i_{q(x/y)}$, $\lambda_{d(x/y)} = L_{d(x/y)} i_{d(x/y)} + \lambda_{PM(x/y)}$, $\omega_{e(x/y)} = n_{p(x/y)} \omega_{r(x/y)}$, (x/y) 代表 X 轴, Y 轴, $V_{d(x/y)}$, $V_{q(x/y)}$ 代表 $d-q$ 轴电压, $i_{q(x/y)}$, $i_{d(x/y)}$ 代表 $d-q$ 轴电流, $R_{s(x/y)}$ 代表相绕组电阻, $L_{q(x/y)}$, $L_{d(x/y)}$ 代表 $d-q$ 轴的诱导, $\omega_{r(x/y)}$ 代表转子的角速度, $\omega_{e(x/y)}$ 代表电子角速度, $\lambda_{PM(x/y)}$ 代表永磁磁链数目, $n_{p(x/y)} = 1$ 代表基层极对数, 而且:

$$\begin{cases} \omega_{r(x/y)} = \pi v_{(x/y)} / \tau_{(x/y)} \\ v_{e(x/y)} = n_{p(x/y)} v_{(x/y)} = 2\tau_{(x/y)} f_{e(x/y)} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, $v_{(x/y)}$ 代表转子的线速度, $\tau_{(x/y)} = 32$ mm 是极间距, $v_{e(x/y)}$, $f_{e(x/y)}$ 分别代表电子线速度与电子频率, 因此产生的电磁量为:

$$P_{e(x/y)} = F_{e(x/y)} v_{e(x/y)} = 3n_{p(x/y)} [\lambda_{d(x/y)} i_{q(x/y)} + (L_{d(x/y)} - L_{q(x/y)}) i_{d(x/y)} i_{q(x/y)}] \omega_{e(x/y)} / 2, \quad (3)$$

电磁力为:

$$F_{e(x/y)} = 3\pi n_{p(x/y)} [\lambda_{d(x/y)} i_{q(x/y)} + (L_{d(x/y)} - L_{q(x/y)}) i_{d(x/y)} i_{q(x/y)}] / 2\tau_{(x/y)}, \quad (4)$$

应用场向控制, 则上式可简化为:

$$\begin{cases} F_{e(x/y)} = K_{f(x/y)} i_{q(x/y)}^* \\ K_{f(x/y)} = 3\pi n_{p(x/y)} \lambda_{PM(x/y)} / 2\tau_{(x/y)} \end{cases}, \quad (5)$$

采用基于转子位置的阶跃响应曲线拟合技术建立电机驱动系统模型, 为便于控制器设计, 控制回路的位置和速度信号设置为 1, $v = 0.053\ 234$ m/s, 系统的主要参数为:

$$\begin{aligned} \bar{K}_{fx} &= 56 \text{ N/A}, \bar{M}_x = 0.320\ 5 \text{ (N} \cdot \text{s)/V}, \bar{D}_x = \\ &62.568\ 2 \text{ N/V} \\ \bar{K}_{fy} &= 56 \text{ N/A}, \bar{M}_y = 0.841\ 2 \text{ (N} \cdot \text{s)/V}, \bar{D}_y = \\ &25.278\ 5 \text{ N/V}, \end{aligned}$$

考虑系统参数及外界扰动的变化, X-Y 轴运动控制系统在实际应用当中是一个非线性时域系统。

3 基于区间二型模糊神经网络的运动控制系统设计

3.1 区间二型模糊神经网络控制系统结构

本文提出了基于区间二型模糊神经网络的自适应 X-Y 轴运动控制系统, 对 x 轴与 y 轴分别控

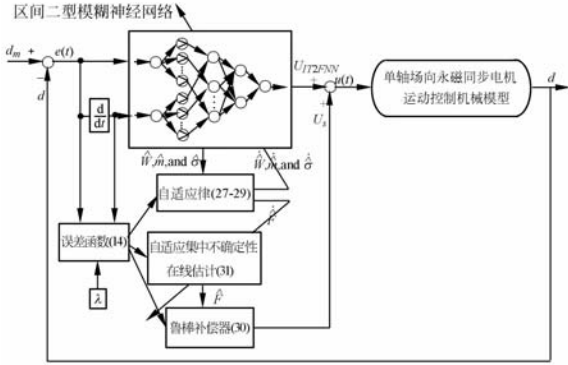


图 1 区间二型模糊神经网络控制系统

Fig.1 Interval type-II fuzzy neural network control system

制。图 1 为单轴的区间二型模糊神经网络控制系统框图。假设不考虑系统参数变量, 外部干扰, 交叉耦合干扰以及摩擦力, 则重写方程式(3)~(4), 单轴场向伺服控制可以表示为:

$$\ddot{d}(t) = -\frac{\bar{D}}{M}\dot{d}(t) + \frac{Kf}{M}i_q^*(t) \triangleq A_n\dot{d}(t) + B_nu(t) \quad (6)$$

现在考虑系统参数变量, 外部干扰, 交叉耦合干扰以及摩擦力的存在, 对于单轴定向伺服控制表示为:

$$\begin{aligned} \ddot{d}(t) = & (A_n + \Delta A)\dot{d}(t) + (B_n + \Delta B)u(t) + \\ & (C_n + \Delta C)[F_L + f(v)] = \\ & A_n\dot{d}(t) + B_nu(t) + H(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $C_n = -1/\bar{M}$, $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ 分别代表由于系统参数 M, d 产生的不确定性, 跟踪误差为 $e(t) = d_m - d$, $H(t) = \Delta A\dot{d}(t) + \Delta Bu(t) + (C_n + \Delta C)[F_L +$

$f(v)]$, 误差功能函数可描述为:

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (8)$$

其中 $\lambda > 0$, 对时间的误差函数取差分, 则上式变为:

$$\frac{1}{B_n}\dot{s}(t) = \frac{A_n}{B_n}s(t) - u(t) + L(t) \quad (9)$$

未知的动态函数 $L(t)$ 定义为:

$$L(t) = \frac{1}{B_n}[\dot{d}_m + \lambda\dot{e}(t) + A_n\lambda e(t) - A_n\dot{d}_m - H(t)] \quad (10)$$

区间二型模糊神经网络的输出用来估计未知动态函数 $L(t)$, 设计鲁棒控制器 U_s 来处理集中不确定性 F , 因此区间二型模糊神经网络控制系统的控制律定义为:

$$u(t) = U_{IT2FNN} + U_s$$

将上式的控制律代入到方程式(9)中, 则闭环动态可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{B_n}\dot{s}(t) = & L(t) - U_{IT2FNN} - U_s + \frac{A_n}{B_n}s(t) = \\ = & \tilde{L} - U_s + \frac{A_n}{B_n}s(t) \end{aligned} \quad (11)$$

逼近误差 \tilde{L} 定义为:

$$\tilde{L} = L(t) - \hat{L} = \frac{1}{2}[W^{*T}Y^*(x^1, m^*, \sigma^*) - \hat{W}^T\hat{Y}(x^1, \hat{m}, \hat{\sigma})] + \epsilon_L \quad (12)$$

其中, ϵ_L 为最小重构误差, W^*, m^*, σ^* 是区间二型模糊神经网络中参数 W, m, σ 的最优化值, $\hat{W}, \hat{m}, \hat{\sigma}$ 是通过调整算法处理后的最优化参数的估计值, 为方便表达, 下面都采用表达式 $Y^* = Y^*(x^1, m^*, \sigma^*)$, $\hat{Y} = \hat{Y}(x^1, \hat{m}, \hat{\sigma})$, 方程式(12)可缩写为:

$$\tilde{L} = \frac{1}{2}W^{*T}\tilde{Y} + \frac{1}{2}\tilde{W}^T\hat{Y} + \epsilon_L \quad (13)$$

3.2 收敛性与稳定性分析

为保证闭环系统有良好的稳定性和跟踪效果, 并能够在线调整区间二型模糊神经网络的连接权值, 高斯函数中心值以及标准偏差值, 这里使用了线性化处理技术, 将区间二型模糊神经网络的非线性输出转换成部分线性项, 并且使用扩展 Lyapunov 理论做了证明。将 \tilde{Y} 泰勒序列展开为:

$$\tilde{Y} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_R}{\partial m} \\ \frac{\partial Y_L}{\partial m} \end{bmatrix}^T \Big|_{m=\hat{m}} (m^* - \hat{m}) + \begin{bmatrix} \frac{\partial Y_R}{\partial m} \\ \frac{\partial Y_L}{\partial m} \end{bmatrix}^T \Big|_{\sigma=\hat{\sigma}} (\sigma^* - \hat{\sigma}) + N = Y_m^T \tilde{m} + Y_\sigma^T \tilde{\sigma} + N \quad (14)$$

其中, N 代表高阶序列。定义高阶序列的边界: 首先, 假设网络参数值由已知正数值来定界, 即 $\|W^*\| \leq W_b, \|m^*\| \leq m_b, \|\sigma^*\| \leq \sigma_b$, 其中的 W_b, m_b, σ_b 为已知项。其次, 定义期望的参考轨迹的边界为:

$$\left\| \begin{matrix} d_m \\ \dot{d}_m \end{matrix} \right\| \leq D_m, \quad (15)$$

其中, D_m 为已知项, 而且, 对于时间 t , 区间二型模糊神经网络的输入向量 x^1 定界为:

$$\|x^1\| \leq k_1 D_m + k_2 \|s(t)\|. \quad (16)$$

由于 Y 与它的偏差值通过高斯函数来定界, 则泰勒序列高阶项也被定界了, 重写方程式(14):

$$N(x^1, \tilde{m}, \tilde{\sigma}) = [Y^* - \hat{Y}] - Y_m^T \tilde{m} - Y_\sigma^T \tilde{\sigma}, \quad (17)$$

通过方程式(16), 泰勒序列高阶项可定界为:

$$\|N(x^1, \tilde{m}, \tilde{\sigma})\| \leq k_3 + k_4 D_m \|\tilde{m}\| \|\tilde{\sigma}\| + k_5 \|\tilde{m}\| \|s(t)\| + k_6 \|\tilde{\sigma}\| \|s(t)\|. \quad (18)$$

将方程式(14)代人方程式(13)得到:

$$\begin{aligned} \tilde{L} &= \frac{1}{2} \dot{W}^T \tilde{Y} + \frac{1}{2} \tilde{W}^T \tilde{Y} + \frac{1}{2} \dot{W}^T \hat{Y} + \epsilon_L = \\ &\frac{1}{2} \dot{W}^T (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) + \frac{1}{2} \dot{W}^T (Y_m^T \tilde{m} + Y_\sigma^T \tilde{\sigma}) + F, \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $F = (1/2) W^{*T} (Y_m^T m^* + Y_\sigma^T \sigma^* + N) - (1/2) \dot{W}^T (Y_m^T m^* + Y_\sigma^T \sigma^*) + \epsilon_L$ 被定义为集中不确定性, 将方程式(24)代人方程式(16)中, 闭环动态方程变为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{B_n} s(t) &= \frac{1}{2} \tilde{W}^T (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) + \frac{1}{2} \dot{W}^T (Y_m^T \hat{m} + Y_\sigma^T \hat{\sigma}) + F - U_s + \frac{A_n}{B_n} s(t). \end{aligned} \quad (20)$$

集中不确定性 F 包括最小重构误差, 优化网络参数及泰勒序列的高阶项。由于这些项在实际应用当中不适用, 因此采用鲁棒补偿器来观察集中不确定性 F 。

定理 1: 考虑驱动系统的数学模型用方程式(6)来表示, 如果应用方程式(8)为控制律, 方程式(21)~(23)为区间二型模糊神经网络的自适应学习算法, 方程式(24)为鲁棒补偿器, 方程式(25)为自适应集中不确定性估计, 则该区间二型模糊神经网络控制系统一定是稳定的。

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \eta_1 (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) s(t), \quad (21)$$

$$\dot{m}^T = \frac{1}{2} \eta_2 \dot{W}^T Y_m^T s(t), \quad (22)$$

$$\dot{\sigma}^T = \frac{1}{2} \eta_3 \dot{W}^T Y_\sigma^T s(t), \quad (23)$$

$$U_s = \hat{F}(t), \quad (24)$$

$$\dot{\hat{F}}(t) = \eta_4 s(t), \quad (25)$$

其中, $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 都是正数, $\hat{F}(t)$ 是集中不确定性 F 的在线估计值。

证明: 为使误差函数达到最小值的同时获取 W, m, σ, F 的自适应律, 选择下面的 Lyapunov 功能函数:

$$\begin{aligned} V_L(E(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(t)) &= \frac{1}{2B_n} s^2(t) + \frac{1}{2\eta_1} \tilde{W}^T \tilde{W} + \\ &\frac{1}{2\eta_2} \tilde{m}^T \tilde{m} + \frac{1}{2\eta_3} \tilde{\sigma}^T \tilde{\sigma} + \frac{1}{2\eta_4} \hat{F}^2(t), \end{aligned} \quad (26)$$

对方程式取时间导数, 将方程式(20)代人得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \frac{1}{B_n} s \dot{s} - \frac{1}{\eta_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} - \frac{1}{\eta_2} \dot{\tilde{m}}^T \tilde{m} - \frac{1}{\eta_3} \dot{\tilde{\sigma}}^T \tilde{\sigma} - \frac{1}{\eta_4} \dot{\hat{F}} \hat{F} = \\ &\tilde{W}^T \left[\frac{1}{2} (\hat{Y} - Y_m^T \hat{m} - Y_\sigma^T \hat{\sigma}) s - \frac{1}{\eta_1} \dot{\tilde{W}} \right] + \\ &\left[\frac{1}{2} \dot{W}^T Y_m^T s - \frac{1}{\eta_2} \dot{\tilde{m}}^T \tilde{m} \right] \tilde{m} + \left[\frac{1}{2} \dot{W}^T Y_\sigma^T s - \frac{1}{\eta_3} \dot{\tilde{\sigma}}^T \tilde{\sigma} \right] \tilde{\sigma} + \\ &[F - U_s + \frac{A_n}{B_n} s] s - \frac{1}{\eta_4} \dot{\hat{F}} \hat{F}. \end{aligned} \quad (27)$$

如果区间二型模糊神经网络的自适应学习算法按照方程式(21)~(23)设计, 鲁棒补偿器按方程式(24)设计, 自适应集中不确定性估计按方程式(25)设计, 则方程式(27)可改写为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= s [F - \hat{F} + \frac{A_n}{B_n} s] - \frac{1}{\eta_1} \dot{\hat{F}} \hat{F} = \\ &\tilde{F} [s - \frac{1}{\eta_1} \dot{\hat{F}}] + s \frac{A_n}{B_n} s = s \frac{A_n}{B_n} s \leq 0, \end{aligned} \quad (28)$$

由于 $\dot{V}_L(s(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}) \leq 0$, 这意味着 $s(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(t)$ 都是有界的, 同时定义

$$L_a(t) = \frac{-s(t) A_n}{B_n} E(t) - \dot{V}_L(s(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(t))$$

并对其积分得:

$$\int_0^t L_a(\tau) d\tau = V_L(s(0), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(0)) - V_L(s(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(t)). \quad (29)$$

由于 $V_L(s(0), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(0))$ 是有界的, $V_L(s(t), \tilde{W}, \tilde{m}, \tilde{\sigma}, \hat{F}(t))$ 是非递增有界的, 所以得到下面的结论:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t L_a(\tau) d\tau < \infty, \quad (30)$$

而且, $\dot{L}_a(t)$ 有界, 因此可得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} L_a(t) =$

0, 表明当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s(t)$ 始终收敛于零, 该控制系统是稳定的。

4 实验结果

采用 TMS320C32 浮点数字信号处理器作为核心控制计算机来设计的自适应双轴运动控制系统, 结构图如图 2 所示。

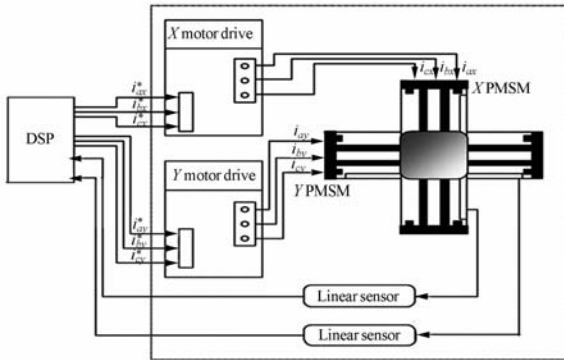


图 2 双轴运动控制系统框图

Fig. 2 DSP-based double axis motion control system

采用 TMS320C32 浮点数字信号处理器作为核心控制计算机^[15], 它的工作频率为 60 MHz, 包括多通道数模转换器和模数转换器, 并行 I/O 口, 编码器接口。数字滤波器和频电路嵌入到编码器接口电路中, 以提高位置信号反馈的准确度。

电机驱动以及双轴运动系统的机械机构如图 3 所示。使用 C 和汇编语言来编写程序, 通过 EPROM 下载到 DSP。区间二型模糊神经网络的实时实现包括两个程序: 一个主程序, 一个中断服务程序。主程序中初始化参数, I/O 口及中断服务接口, 中断服务程序的采样时间为 0.2 ms, 通过线性霍尔传感器获取位置信息, 同时读取子控制程序传来的控制向量 i_{qx}^*, i_{qy}^* 。然后将中断服务程序计算的三相流命令通过数模转换器发送到电机。子控制程序的执行产生 0.1 ms 的采样频率, 子控制程序首先从编码器读取位置信息, 计算电机速度 v_x, v_y , 通过区间二型模糊神经网络控制算法计算控制向量 i_{qx}^*, i_{qy}^* 。最后通过跟踪蝶形轮廓曲线来验证该控制系统的轨迹跟踪效果及鲁棒性。

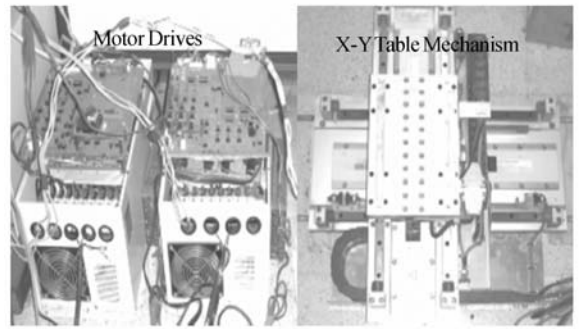


图 3 电机驱动及双轴运动系统机械结构

Fig. 3 Motor drives and axis motion system mechanism

为了评估区间二型模糊神经网络控制系统实时控制的性能, 进行了两个实验: 第一个是正常条件下, 估计区间二型模糊神经网络控制器的轨迹跟踪能力; 第二个是在运动转台上加入一个 10 kg 的铁盘, 从而测试参数变化情况下区间二型模糊神经网络控制器的鲁棒性。跟踪试验的参考图形如图 4 所示, 为蝶形轮廓。

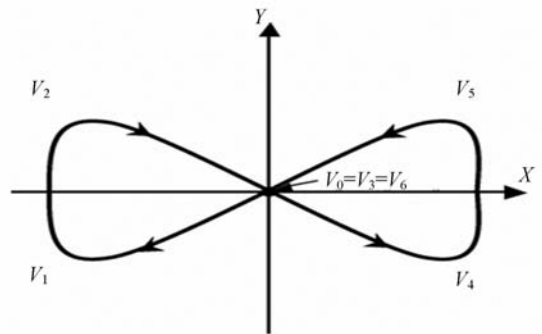


图 4 双轴运动参考轨迹: 蝶形

Fig. 4 Reference contour of X-Y axes; Butterfly contour

同时, 为了比较区间二型模糊神经网络与一型模糊神经网络的性能差异, 定义如下几个性能评价指标: 最大跟踪误差 T_M , 平均跟踪误差 m , 跟踪误差的标准偏差 T_S :

$$T_M = \max_k \sqrt{T_x(k)^2 + T_y(k)^2}, T_{(x/y)}(k) = d_{m(x/y)}(k) - d_{(x/y)}(k), \quad (31)$$

$$m = \frac{\sum_{k=1}^n T(k)}{n}, T(k) = \sqrt{T_x(k)^2 + T_y(k)^2}, \quad (32)$$

$$T_S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (T(k) - m)^2}{n}}, \quad (33)$$

通过最大跟踪误差与平均跟踪误差的比较,便能验证控制系统的性能。区间二型模糊神经网络控制器的学习率参数:权值区间,中心值,标准偏差给定为:

$$\eta_{1x}=0.085, \eta_{2x}=0.035, \eta_{3x}=0.025, \eta_{4x}=0.045, \lambda_x=1.2$$

$$\eta_{1y}=0.1, \eta_{2y}=0.035, \eta_{3y}=0.035, \eta_{4y}=0.045, \lambda_y=1.0$$

通过试错法选择上式的学习速率参数可以达到很好的实验性能。考虑区间二型模糊神经网络复杂,训练与推理过程计算量大等特性,简化网络结构来实现实时控制及跟踪曲线的实时响应十分重要。文中在二型模糊推理中采用三个模糊推理规则,每个规则有两个前件和一个后件,二型模糊隶属函数的初始值与权值区间初始值设置如下:

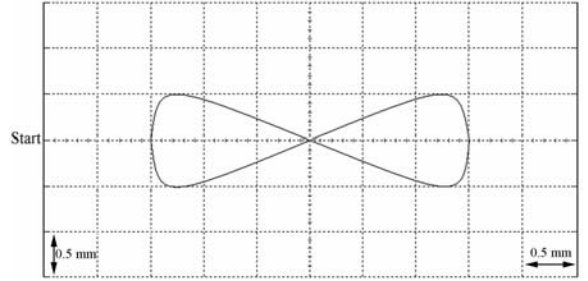
$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{m}_{11x}=0.3, \bar{m}_{12x}=0.1, \bar{m}_{13x}=0.6 \\ \bar{m}_{21x}=0.3, \bar{m}_{22x}=0.1, \bar{m}_{23x}=1.6 \\ \underline{m}_{11x}=-0.5, \underline{m}_{12x}=-0.2, \underline{m}_{13x}=-0.2 \\ \underline{m}_{21x}=-1.5, \underline{m}_{22x}=-0.2, \underline{m}_{23x}=-0.2 \\ \bar{m}_{11x}=0.6, \bar{m}_{12x}=0.8, \bar{m}_{13x}=1.2 \\ \bar{m}_{21x}=0.3, \bar{m}_{22x}=0.7, \bar{m}_{23x}=1.4 \\ \underline{m}_{11y}=-1.7, \underline{m}_{12y}=-0.2, \underline{m}_{13y}=-0.1 \\ \underline{m}_{21y}=-1.3, \underline{m}_{22y}=-0.4, \underline{m}_{23y}=-0.2 \end{array} \right. , \quad (34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{11x}=5.2, \sigma_{12x}=7.5, \sigma_{13x}=3.5 \\ \sigma_{21x}=4.6, \sigma_{22x}=5.5, \sigma_{23x}=6.3 \\ \sigma_{11y}=5.6, \sigma_{12y}=2.5, \sigma_{13y}=4.6 \\ \sigma_{21y}=3.2, \sigma_{22y}=5.5, \sigma_{23y}=6.5 \end{array} \right. , \quad (35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [\omega_{R1x}^4, \omega_{L1x}^4]=[-0.25, -5.36]; [\omega_{R2x}^4, \omega_{L2x}^4]= \\ \quad [-0.56, -6.53] \\ [\omega_{R3x}^4, \omega_{L3x}^4]=[-0.45, -1.24]; [\omega_{R1y}^4, \omega_{L1y}^4]= \\ \quad [-0.55, -2.66] \\ [\omega_{R2y}^4, \omega_{L2y}^4]=[-0.83, -4.35]; [\omega_{R3y}^4, \omega_{L3y}^4]= \\ \quad [-0.59, -7.24] \end{array} \right. , \quad (36)$$

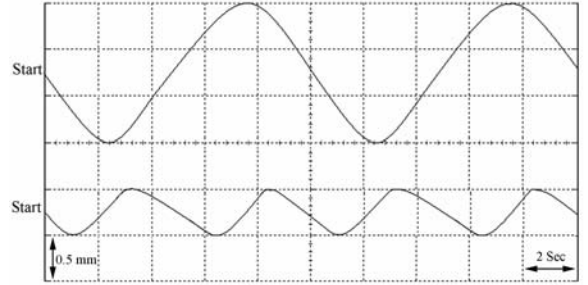
以上参数初始值刚开始是随机选择的,区间二型模糊神经网络使用方程式(26)~(28)的学习算法,经过半个周期的学习便可以获得精确的跟踪效果,学习过程结束后的参数值保存下来作为下次学习的初始值。图 5 显示正常条件下,应用区间二型模糊神经网络跟踪蝶形轮廓曲线的响应

及控制量与跟踪误差的响应曲线。图 6 显示了参数变化条件下,应用区间二型模糊神经网络跟踪蝶形轮廓曲线的响应及控制量与跟踪误差的响应曲线。



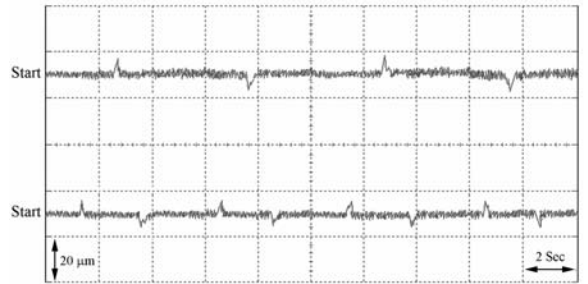
(a) 蝶形跟踪轨迹

(a) Butterfly contour tracking trajectory



(b) X/Y 轴跟踪响应

(b) Tracking response of X- and Y-axes

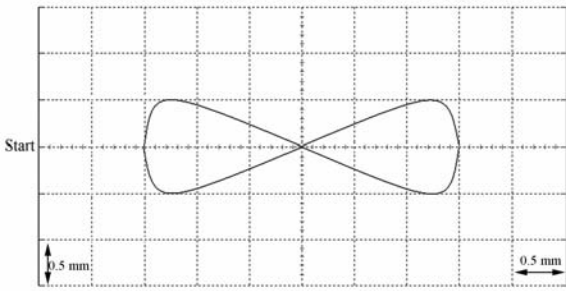


(c) X/Y 轴跟踪误差

(c) Tracking error of X- and Y-axes

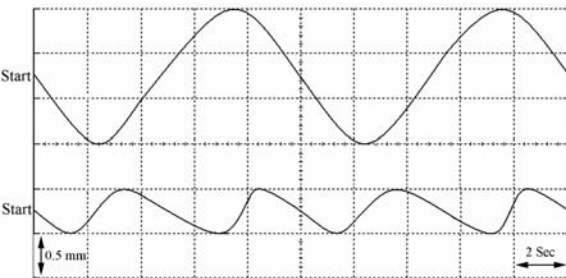
图 5 正常条件下,控制系统针对规定输入的响应曲线
Fig. 5 Experimental responses of it2fnn control system due to butterfly contours under nominal condition

从仿真结果可以看到,该控制系统具有很好的跟踪效果,并且当参数变化及外部干扰的条件



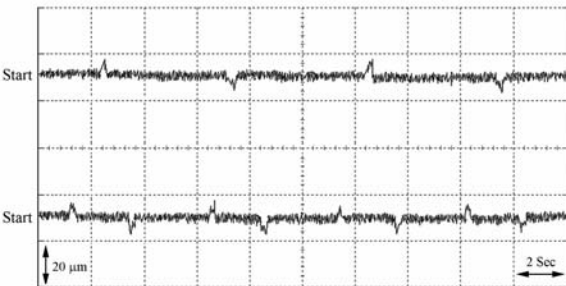
(a) 蝶形跟踪轨迹

(a) Butterfly contour tracking trajectory



(b) X/Y 轴跟踪响应

(b) Tracking response of X- and Y-axes



(c) X/Y 轴跟踪误差

(c) Tracking error of X- and Y-axes

图 6 参数变化下,控制系统针对规定输入的响应曲线
Fig.6 Experimental responses of it2fnn control system due to butterfly contours under parameter variation condition

下,系统的鲁棒性也可以得到保证。为说明区间二型模糊神经网络控制系统相对于一型模糊神经网络控制系统的控制性能有所提高,这里也进行了一型模糊神经网络控制系统的仿真。一型模糊神经网络有 9 个规则,每个输入节点有 3 个隶属函数。

表 1 正常条件下,一型与区间二型模糊神经网络控制系统性能比较

Tab.1 Performance comparison of type- I and interval type- II fuzzy neural network control systems under nominal condition (μm)

	一型模糊神经网络	二型模糊神经网络
最大误差	30.565	25.482
平均误差	7.033	2.576
标准偏差	6.313	2.033

表 2 参数变化条件下,一型与区间二型模糊神经网络控制系统性能比较

Tab.2 Performance comparison of type- I and interval type- II fuzzy neural network control systems under parameter variation condition (μm)

	一型模糊神经网络	二型模糊神经网络
最大误差	52.642	42.587
平均误差	8.374	5.641
标准偏差	7.921	4.376

采用一型模糊神经网络和区间二型模糊神经网络控制系统在正常条件与参数变化条件下的性能比较如表 1 及表 2 所示,从表中可看出,区间二型模糊神经网络控制系统具有更好的控制性能,针对不确定性因素,区间二型模糊神经网络控制系统鲁棒性更强。

5 结 论

本文成功地将区间二型模糊神经网络应用到双轴运动控制系统中。首先,介绍了场向永磁同步电机伺服驱动控制;其次,描述了区间二型模糊神经网络结构,分析了控制系统的稳定性,并用区间二型模糊神经网络逼近未知动态特性。然而,在设计区间二型模糊神经网络时,最小重构误差、优化参数、泰勒序列的高阶项等集中不确定性因素不可避免,而且导致控制精度下降,因此,使用了简单的自适应算法来调整集中不确定性。该算法通过鲁棒补偿器来在线逼近误差和外部干扰且能在线训练区间二型模糊神经网络的参数。最后,通过跟踪蝶形轮廓曲线的实验验证了区间二型模糊神经网络实时控制系统的有效性。对比于

一型模糊神经网络控制系统, 区间二型模糊神经网络控制系统具有更好的控制性能, 针对不确定

性因素, 区间二型模糊神经网络控制系统相对于一型模糊神经网络控制系统鲁棒性更强。

参考文献:

- [1] LIM H, SEO J W, CHOI C H. Position control of XY table in CNC machining center with nonrigid ballscrew [C]. *Pro. Amer. Control Conference*, 2000; 1542-1546.
- [2] 郑晓虎, 朱荻. 模糊神经网络在 UV-LIGA 工艺优化中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1): 139-144.
- ZHENG X H, ZHU D. Application of fuzzy neural network to optimizing UV-LIGA process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 139-144. (in Chinese)
- [3] 张玲瑄, 贾振元. 微细电火花加工放电状态逐级映射检测[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(3): 663-669.
- ZHANG L X, JIA ZH Y. Successive mapping detection of micro EDM discharge state [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 663-669. (in Chinese)
- [4] LIN F J, SHIEN H J, SHEN P H. An adaptive recurrent-neural network motion controller for X-Y table in CNC machine[J]. *IEEE Transaction System Manufacture Cybern. B, Cybern.*, 2006, 36(2): 286-299.
- [5] LIU Z, ZHANG Y, WANG Y. A type-2 fuzzy switch-

ing control system for biped robots[J]. *IEEE Transaction System Manufacture Cybernet. C, Application*, 2007, 37(6): 1202-1213.

- [6] AKPOLAT Z H, ALTINORS A. Type-2 fuzzy reaching law speed control of an electric drive[J]. *International Journal Model Simulation*, 2007, 27(3): 273-279.
- [7] HAGRAS H. A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots[J]. *IEEE Transaction Fuzzy System*, 2004, 12(4): 524-539.
- [8] LIANG Q, MENDEL J M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design[J]. *IEEE Transaction Fuzzy System*, 2000, 8(5): 535-550.
- [9] WANG C S, LEE T T. Dynamical optimal training for interval type-2 fuzzy neural network[J]. *IEEE Transaction System Manufacture Cybern. B, Cybern.*, 2004, 34(3): 1462-1477.
- [10] 季宏丽, 裘进浩. 基于 TMS320F2812 的悬臂梁振动半主动控制[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(1): 126-131.
- JI H L, QIU J H. Semi-active control for structural vibration of cantilever beam based on TMS320F2812[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 126-131. (in Chinese)

作者简介:



陈向坚(1983—), 女, 吉林人, 博士研究生, 2004年、2006年于东北电力大学分别获得学士、硕士学位, 主要微型飞行器自动控制、智能控制方面的研究。E-mail: cxj831209@163.com



李迪(1983—), 男, 吉林白山人, 博士研究生, 2004年、2006年于东北电力大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事嵌入式系统、微型飞行器的图像传输与自动控制方面的研究。E-mail: li-di19821111@163.com



白越(1979—), 男, 辽宁北票人, 博士, 副研究员, 主要研究微小型无人飞行器、极限条件下的摩擦润滑学及飞轮实用化技术。E-mail: baiy@ciomp.ac.cn

通讯作者:



续志军(1953—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事电子技术、自动控制方面的研究。E-mail: xuzj538@ciomp.ac.cn