

文章编号: 1000-8152(2005)04-0551-06

基于动态递归模糊神经网络的自适应电液位置跟踪系统

张友旺^{1,2}, 桂卫华¹, 赵泉明³

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;
3. 湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了动态递归模糊神经网络(DRFNN)以在线估计电液位置跟踪系统中包括非线性、参数不确定性、负载干扰等在内的未知动态非线性函数, 基于 Lyapunov 稳定性理论推导出 DRFNN 可调参数和估计误差的界的自适应律, 并构造出稳定的自适应控制器. 实验结果表明: 基于 DRFNN 的自适应控制器可使电液位置跟踪系统具有较强的鲁棒性和满意的跟踪性能.

关键词: 动态递归模糊神经网络; 电液位置跟踪系统; 变结构控制; 鲁棒性

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A

Adaptive electro-hydraulic position tracking system based on dynamic recurrent fuzzy neural network

ZHANG You-wang^{1,2}, GUI Wei-hua¹, ZHAO Quan-ming³

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
3. College of mechanical and Automobile Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: Dynamic recurrent fuzzy neural network(DRFNN) is proposed to evaluate online the unknown dynamic nonlinear functions that include nonlinearity, parameter uncertainty, load disturbance et al. in electro-hydraulic position tracking system, adaptive laws of the adjustable parameters and the evaluation error bounds of DRFNN are formulated based on Lyapunov stability theory, and a stable adaptive controller is synthesized. The experimental results show that the adaptive controller based on DRFNN can make electro-hydraulic position tracking system more robust and obtain satisfactory tracking performance.

Key words: dynamic recurrent fuzzy neural network(DRFNN); electro-hydraulic position tracking system; variable structure control; robustness

1 引言(Introduction)

在解决不确定性和非线性等因素对大范围内工作的电液位置跟踪系统性能的影响方面, 模糊系统^[1]、神经网络^[2,3]、滑模变结构控制^[4,5]等取得了很好的效果. 为增强系统鲁棒性, 集成了模糊逻辑系统和/或神经网络的非线性自适应控制技术获得了迅速发展^[6], 但这些算法中集成的是静态模糊系统和/或静态神经网络, 不宜于动态系统的辨识和控制. 本文基于 DRFNN 的自适应控制器, 用 DRFNN 在线估计动态系统的非线性函数, 并基于 Lyapunov 稳定性理论导出参数自适应律, 保证了系统的稳定性.

2 问题描述(Problem formulation)

2.1 动态递归模糊神经网络(Dynamic recurrent fuzzy neural network)

单输入单输出 DRFNN 如图 1, 其独特的结构单元记忆前一时刻的适用度值, 相当于一时延算子. 其中: 第 1 层为输入层, 该层的结点直接与输入量 x 连接, 起着将输入值 x 传送到下一层的作用.

第 2 层结点代表语言变量值. 其作用是计算输入量属于各语言变量值模糊集合的隶属函数值 $\mu^j = \exp[-(\frac{x - \bar{x}^l}{\sigma^l})^2]$, $j = l = 1, 2, \dots, m$. m 是 x 的模糊分割数及规则数, \bar{x}^l 和 σ^l 分别为隶属函数的中心和宽度.

第3层的每个结点代表一条模糊规则,其作用是匹配模糊规则的前件,并计算每条规则的适用度.

$$s(l) = \sum_{j=1}^m w_{jl}^1 \omega_{c,j}(k) + \exp\{-[\frac{x(k) - \bar{x}^l}{\sigma^l}]^2\} - \theta_l, \quad (1)$$

$$\omega_{c,j}(k) = \omega_j(k-1), \quad (2)$$

$$\omega_l(k) = f[s(l)] = \frac{1}{1 + e^{-\mu[s(l)-0.5]}}. \quad (3)$$

因此,每条规则 k 时刻的适用度 $\omega_l(k)$ 既包括由当前输入计算出的适用度值 $z^l(k) = \exp\{-[\frac{x(k) - \bar{x}^l}{\sigma^l}]^2\}$,也包括前一时刻各适用度值的贡献,该层单元采用式(3)的 s 激活函数.

第4层实现归一化计算,即

$$\bar{\omega}_l(k) = \frac{\omega_l(k)}{\sum_i \omega_i(k)}. \quad (4)$$

第5层是输出层,实现清晰化计算,即

$$y(k) = \sum_{l=1}^m \bar{\omega}_l(k) \bar{y}^l. \quad (5)$$

\bar{y}^l 为输出变量第 l 个语言变量值隶属函数中心值.

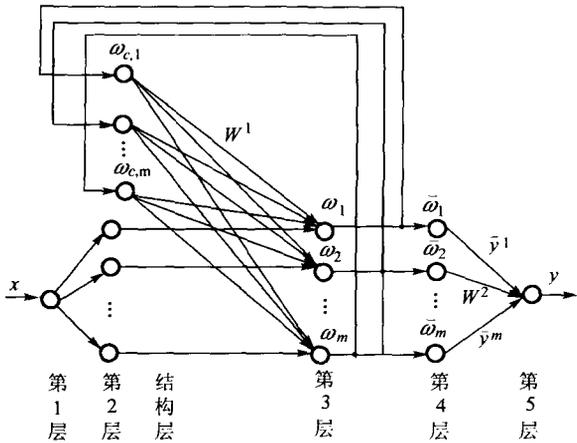


图1 单输入单输出 DRFNN 结构图

Fig. 1 Structure diagram of single input single output DRFNN

2.2 电液位置跟踪系统 (Electro-hydraulic position tracking system)

取 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y \ \dot{y} \ \ddot{y}]^T$, 并考虑系统未知规律部分,对称缸电液位置跟踪系统的状态空间为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = f_0(x) + f_\Delta(x) + [g_0 + g_\Delta(x)]u. \end{cases} \quad (6)$$

式中: y 为活塞和负载位移; $f_0(x) = -\frac{4\beta_e K_L K_{lc}}{MV_t} x_1 - \frac{4\beta_e A^2 + 4\beta_e B_c K_{lc} + K_L}{MV_t} x_2 - (\frac{4\beta_e K_{lc}}{V_t} + \frac{B_c}{M}) x_3$ 和 $g_0 =$

$\frac{4\beta_e A}{MV_t} K_{q0} K_x$ 为系统公称参数确定的已知规律部分,

其中: A 为活塞有效作用面积, V_t 为液压缸两腔室总容积, β_e 为等效体积弹性模数, M 为活塞和负载总质量, B_c 为粘性阻尼系数, K_L 为负载刚度, $K_{lc} = K_c + C_{lc}$, K_c 为伺服阀流量压力系数, C_{lc} 为总泄漏系数, K_x 为伺服阀阀芯位移 x_v 与伺服放大器输入电压 u 之间的比例系数, 即 $x_v = K_x u$, K_{q0} 为伺服阀的流量增益 K_q 在零负载压力时的值, 且 $K_q = C_d w \sqrt{(p_s - p_L)/\rho}$, C_d 为流量系数, w 为节流窗口面积梯度, p_L 为负载压力; p_s 为油源压力, ρ 为油液密度; $f_\Delta(x)$ 为包括非线性、参数不确定性、负载干扰 $d(t) = -\frac{4\beta_e C_{lc}}{MV_t} F - \frac{1}{M} \frac{dF}{dt}$ 等在内的未知函数, F 为任意外负载力; $g_\Delta(x)$ 为负载压力变化引起的伺服阀流量增益的变化量, 负载干扰为零时, 由液压缸的力平衡方程可知负载压力是向量 x 的函数, 因此 $g_\Delta(x)$ 为向量 x 的未知函数.

3 控制器设计及稳定性分析 (Controller design and stability analysis)

3.1 控制器设计 (Controller design)

为使所研究的问题具有一般性,将上述的仿射非线性系统(6)由3阶拓展到 n 阶.控制器的设计就是求反馈控制 $u = u(x | \theta_{f\Delta}, \theta_{g\Delta})$ 以及调整参数向量 $\theta_{f\Delta}$ 和 $\theta_{g\Delta}$ 的自适应律,使 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{t \rightarrow \infty} (x_d - x) = 0$, 其中 $x_d = [y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n-1)}]^T$, y_d 为期望轨迹.

设 $e = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T = [y_d - y, \dot{y}_d - \dot{y}, \dots, y_d^{(n-1)} - y^{(n-1)}]^T$. 分别用 2.1 节的 DRFNN 系统 $\hat{f}_\Delta(x | \theta_{f\Delta})$ 和 $\hat{g}_\Delta(x | \theta_{g\Delta})$ 估计未知函数 $f_\Delta(x)$ 和 $g_\Delta(x)$, 其中 $\hat{f}_\Delta(x | \theta_{f\Delta})$ 的描述如下:

$$s(l) = \sum_{j=1}^m w_{jl}^1 \omega_{c,j}^f(k) + \exp[-(\frac{x - \bar{x}_f^l}{\sigma_f^l})^2] - \theta_f^l, \quad (7)$$

$$\omega_{c,l}^f(k) = \omega_l^f(k-1), \quad (8)$$

$$\omega_l^f(k) = h[s(l)] = \frac{1}{1 + e^{-\mu[s(l)-0.5]}}. \quad (9)$$

$$\hat{f}_\Delta(x | \theta_{f\Delta}) = \frac{\sum_{l=1}^m \bar{y}_f^l \omega_l^f(k)}{\sum_{l=1}^m \omega_l^f(k)}. \quad (10)$$

式(7)~(10)中的 f 换成 g 则得 $\hat{g}_\Delta(x | \theta_{g\Delta})$. 变量 x_1 作为 DRFNN 的输入, 隶属函数中心 $\bar{x}_\# = [\bar{x}_\#^1, \bar{x}_\#^2, \dots, \bar{x}_\#^m]^T$ 固定, $\theta_{\#\Delta}$ 为隶属函数宽度 $\sigma_\# =$

$[\sigma_{\#}^1, \sigma_{\#}^2, \dots, \sigma_{\#}^m]^T$ 、隐层到输出层的连接权值 $\bar{y}_{\#} = [\bar{y}_{\#}^1, \bar{y}_{\#}^2, \dots, \bar{y}_{\#}^m]^T$ 、结构层权值 $w_{\#}^1 = \begin{bmatrix} w_{\#,11}^1 & w_{\#,12}^1 & \dots & w_{\#,1m}^1 \\ w_{\#,21}^1 & w_{\#,22}^1 & \dots & w_{\#,2m}^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{\#,m1}^1 & w_{\#,m2}^1 & \dots & w_{\#,mm}^1 \end{bmatrix}$ 等可调参数组成的 $2m + m^2$ 维向量, # 表示 f 或 g . 由反馈线性化综合出控制律为

$$u_c = \frac{1}{g_0(x) + \hat{g}(x_1 | \theta_{g\Delta})} [-f_0(x) - \hat{f}_{\Delta}(x_1 | \theta_{f\Delta}) + y_d^{(n)} + C^T e]. \quad (11)$$

$C = [c_n, \dots, c_1]^T$, 且 C 的选取应保证 $s^n + c_1 s^{n-1} + \dots + c_n$ 为 Hurwitz 多项式. 为补偿估计误差等, 增强系统的鲁棒性, 引入控制项 $u_s = \hat{K}_{vsc}^T \varphi \text{sgn}(e^T PB) / \beta$, 即

$$u = u_c + u_s. \quad (12)$$

式中: \hat{K}_{vsc} 为变结构控制增益 K_{vsc}^* 的估计值; φ, P, B 和 β 的定义见 3.2 节.

3.2 稳定性分析(Stability analysis)

定理 1 如系统(6)的控制量为式(12), 且 DRFNN 的可调参数向量和变结构控制增益的自适应律为

$$\dot{\theta}_{f\Delta} = -\Gamma_{f\Delta} e^T PB \frac{\partial \hat{f}_{\Delta}}{\partial \theta_{f\Delta}}, \quad (13)$$

$$\dot{\theta}_{g\Delta} = -\Gamma_{g\Delta} e^T PB \frac{\partial \hat{g}_{\Delta}}{\partial \theta_{g\Delta}} u_c, \quad (14)$$

$$\dot{\hat{K}}_{vsc} = \Gamma_{K_{vsc}} |e^T PB| \varphi, \quad (15)$$

则系统(6)渐近稳定, 式中 $\Gamma_{f\Delta} > 0, \Gamma_{g\Delta} > 0, \Gamma_{K_{vsc}} > 0$ 为自适应增益矩阵, $i \neq j$ 时, $\Gamma_{f\Delta}^{ij} = 0, \Gamma_{g\Delta}^{ij} = 0, \Gamma_{K_{vsc}}^{ij} = 0$.

证 由 $\dot{e}_n = y_d^{(n)} - \dot{x}_n$, 控制分量式(11)和系统(6)拓展后得到 n 阶仿射非线性系统的误差动态方程

$$\dot{e} = \Lambda e + B \{ (\hat{f}_{\Delta} - f_{\Delta}^*) + (f_{\Delta}^* - f_{\Delta}) + [(\hat{g}_{\Delta} - g_{\Delta}^*) + (g_{\Delta}^* - g_{\Delta})] u_c - (g_0 + g_{\Delta}) u_s \}. \quad (16)$$

式中: $\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -c_n & -c_{n-1} & -c_{n-2} & -c_{n-3} & \dots & -c_2 & -c_1 \end{bmatrix}$,

$B = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$, f_{Δ}^* 和 g_{Δ}^* 和分别为函数 $f_{\Delta}(x)$ 和 $g_{\Delta}(x)$ 的最佳逼近.

由 3.1 节中 C 的选取原则可知 Λ 是稳定矩阵, 因此存在正定对称矩阵 P 满足 Lyapunov 方程 $\Lambda^T P + P\Lambda = -Q$. 设候选 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2} \Phi_{f\Delta}^T \Gamma_{f\Delta}^{-1} \Phi_{f\Delta} + \frac{1}{2} \Phi_{g\Delta}^T \Gamma_{g\Delta}^{-1} \Phi_{g\Delta} + \frac{1}{2} \tilde{K}_{vsc}^T \Gamma_{K_{vsc}}^{-1} \tilde{K}_{vsc}. \quad (17)$$

式中: $\Phi_{f\Delta} = \hat{\theta}_{f\Delta} - \theta_{f\Delta}^*, \Phi_{g\Delta} = \hat{\theta}_{g\Delta} - \theta_{g\Delta}^*, \tilde{K}_{vsc} = \hat{K}_{vsc} - K_{vsc}^*$, 且有 $\dot{\Phi}_{f\Delta} = \dot{\hat{\theta}}_{f\Delta}, \dot{\Phi}_{g\Delta} = \dot{\hat{\theta}}_{g\Delta}, \dot{\tilde{K}}_{vsc} = \dot{\hat{K}}_{vsc}$.

考虑

$$\hat{f}_{\Delta} - f_{\Delta}^* = \Phi_{f\Delta}^T \frac{\partial \hat{f}_{\Delta}}{\partial \theta_{f\Delta}} + o(\Phi_{f\Delta}^2),$$

$$|f_{\Delta}^* - f_{\Delta}| \leq w_f, \quad \epsilon_{fd} = |o(\Phi_{f\Delta}^2)| + w_f,$$

$$\hat{g}_{\Delta} - g_{\Delta}^* = \Phi_{g\Delta}^T \frac{\partial \hat{g}_{\Delta}}{\partial \theta_{g\Delta}} + o(\Phi_{g\Delta}^2),$$

$$|g_{\Delta}^* - g_{\Delta}| \leq w_g, \quad \epsilon_g = |o(\Phi_{g\Delta}^2)| + w_g,$$

令 $g = g_0 + g_{\Delta}$, 则 V 沿误差动态方程(16)的时间微分为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{2} \dot{e}^T P e + \frac{1}{2} e^T P \dot{e} + \Phi_{f\Delta}^T \Gamma_{f\Delta}^{-1} \dot{\Phi}_{f\Delta} + \\ & \Phi_{g\Delta}^T \Gamma_{g\Delta}^{-1} \dot{\Phi}_{g\Delta} + \tilde{K}_{vsc}^T \Gamma_{K_{vsc}}^{-1} \dot{\tilde{K}}_{vsc} \leq \\ & -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P B (\epsilon_{fd} + \epsilon_g |u_c| - g u_s) + \\ & e^T P B (\Phi_{f\Delta}^T \frac{\partial \hat{f}_{\Delta}}{\partial \theta_{f\Delta}} + \Phi_{g\Delta}^T \frac{\partial \hat{g}_{\Delta}}{\partial \theta_{g\Delta}} u_c) + \\ & \Phi_{f\Delta}^T \Gamma_{f\Delta}^{-1} \dot{\theta}_{f\Delta} + \Phi_{g\Delta}^T \Gamma_{g\Delta}^{-1} \dot{\theta}_{g\Delta} + \tilde{K}_{vsc}^T \Gamma_{K_{vsc}}^{-1} \dot{\tilde{K}}_{vsc}. \end{aligned} \quad (18)$$

设 $K_{vsc}^* = [\epsilon_{fd}, \epsilon_g]^T, \varphi = [1, |uc|]^T$, 将式(13), (14)代入得

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e + e^T P B [K_{vsc}^{*T} \varphi - g u_s] + \tilde{K}_{vsc}^T \Gamma_{K_{vsc}}^{-1} \dot{\tilde{K}}_{vsc}. \quad (19)$$

设 $g \geq \beta > 0$, 取 $u_s = \hat{K}_{vsc}^T \varphi \text{sgn}(e^T PB) / \beta$, 将式(15)代入得

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e. \quad (20)$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知, 系统(6)一致渐进稳定, DRFNN 控制的电液位置跟踪系统如图 2.

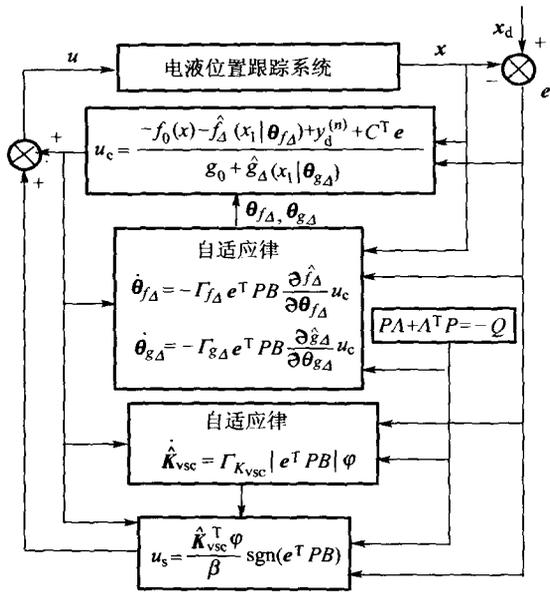


图2 基于DRFNN控制的电液位置跟踪系统

Fig. 2 Electro-hydraulic position tracking system controlled by controller based on DRFNN

3.3 抑制参数漂移的修正算法 (Modified algorithm for preventing parameters from drifting)

结构层权值物理意义模糊, 较难确定其合理范围, 故用带投影算法的参数自适应律^[7]将 w_f^1 和 w_g^1 各元素组成的 m^2 维向量 $\theta_{f\Delta w1}$ 和 $\theta_{g\Delta w1}$ 分别限制在约束集 Ω_{wf} 和 Ω_{wg} 内, 且 $\theta_{f\Delta w1}^{(i)} = \theta_{f\Delta}^{(i+2m)}$, $\theta_{g\Delta w1}^{(i)} = \theta_{g\Delta}^{(i+2m)}$, $1 \leq i \leq m^2$; 其余被调整参数 $\theta_{f\Delta\sigma y}$ 和 $\theta_{g\Delta\sigma y}$ 物理意义明确, 采用分别确定各被调参数调整范围并抑制参数漂移的修正算法^[8], 其中 $\theta_{f\Delta\sigma y}^{(i)} = \theta_{f\Delta}^{(i)}$, $\theta_{g\Delta\sigma y}^{(i)} = \theta_{g\Delta}^{(i)}$, $1 \leq i \leq 2m$.

对 $\theta_{f\Delta w1}$, 考虑 $\Omega_{wf} = \{\theta_{f\Delta w1} : |\theta_{f\Delta w1}| \leq M_{wf}\}$,

$$\dot{\theta}_{f\Delta w1} = \begin{cases} -\gamma_{f\Delta} e^T PB \frac{\partial \hat{f}_\Delta}{\partial \theta_{f\Delta w1}}, \\ \text{当 } |\theta_{f\Delta w1}| < M_{wf} \text{ 或 } |\theta_{f\Delta w1}| = M_{wf} \text{ 且 } e^T PB \frac{\partial \hat{f}_\Delta}{\partial \theta_{f\Delta w1}} \geq 0; \\ -\gamma_{f\Delta} e^T PB \frac{\partial \hat{f}_\Delta}{\partial \theta_{f\Delta w1}} + \gamma_{f\Delta} \frac{e^T PB \cdot \theta_{f\Delta w1}^T}{|\theta_{f\Delta w1}| M_{wf}} \frac{\partial \hat{f}_\Delta}{\partial \theta_{f\Delta w1}} \theta_{f\Delta w1}, \\ \text{当 } |\theta_{f\Delta w1}| = M_{wf} \text{ 且 } e^T PB \frac{\partial \hat{f}_\Delta}{\partial \theta_{f\Delta w1}} < 0. \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\gamma_{f\Delta}$ 为 $\theta_{f\Delta w1}$ 的自适应率, 且 $\Gamma_{f\Delta}^i = \gamma_{f\Delta}$, $2m+1 \leq i \leq 2m+m^2$.

对 $\theta_{g\Delta w1}$, 考虑 $\Omega_{wg} = \{\theta_{g\Delta w1} : |\theta_{g\Delta w1}| \leq M_{wg}\}$,

$$\dot{\theta}_{g\Delta w1} = \begin{cases} -\gamma_{g\Delta} e^T PB \frac{\partial \hat{g}_\Delta}{\partial \theta_{g\Delta w1}} u_c, \\ \text{当 } |\theta_{g\Delta w1}| < M_{wg} \text{ 或 } |\theta_{g\Delta w1}| = M_{wg} \text{ 且 } e^T PB \frac{\partial \hat{g}_\Delta}{\partial \theta_{g\Delta w1}} u_c \geq 0; \\ -\gamma_{g\Delta} e^T PB \frac{\partial \hat{g}_\Delta}{\partial \theta_{g\Delta w1}} u_c + \gamma_{g\Delta} \frac{e^T PB \cdot \theta_{g\Delta w1}^T}{|\theta_{g\Delta w1}| M_{wg}} \frac{\partial \hat{g}_\Delta}{\partial \theta_{g\Delta w1}} \theta_{g\Delta w1} u_c, \\ \text{当 } |\theta_{g\Delta w1}| = M_{wg} \text{ 且 } e^T PB \frac{\partial \hat{g}_\Delta}{\partial \theta_{g\Delta w1}} u_c < 0. \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\gamma_{g\Delta}$ 为 $\theta_{g\Delta w1}$ 的自适应率, 且 $\Gamma_{g\Delta}^i = \gamma_{g\Delta}$, $2m+1 \leq i \leq 2m+m^2$.

对 $\theta_{f\Delta\sigma y}$, 考虑 $\Omega_{f\Delta} = \{\theta_{f\Delta\sigma y} : b_{f\Delta}^i - \delta_{f\Delta}^i \leq \theta_{f\Delta\sigma y}^i \leq c_{f\Delta}^i + \delta_{f\Delta}^i\}$ ($1 \leq i \leq 2m$), $b_{f\Delta}^i, c_{f\Delta}^i$ 分别为相应被调参数距下限和上限 $\delta_{f\Delta}^i$ 的值, $\delta_{f\Delta}^i$ 为设计参数. 定义 $\Psi_{f\Delta}^i = e^T PB \frac{\partial \hat{f}_\Delta}{\partial \theta_{f\Delta\sigma y}}$, $\Psi_{f\Delta}^i$ 为 $\Psi_{f\Delta}$ 的第 i 个分量, $\bar{\Psi}_{f\Delta}^i = (1 + \frac{c_{f\Delta}^i - \theta_{f\Delta\sigma y}^i}{\delta_{f\Delta}^i}) \Psi_{f\Delta}^i$, $\tilde{\Psi}_{f\Delta}^i = (1 + \frac{\theta_{f\Delta\sigma y}^i - b_{f\Delta}^i}{\delta_{f\Delta}^i}) \Psi_{f\Delta}^i$. 则

抑制 $\theta_{f\Delta\sigma y}$ 漂移的修正算法为

$$\dot{\theta}_{f\Delta\sigma y}^i = \begin{cases} -\Gamma_{f\Delta}^i \bar{\Psi}_{f\Delta}^i, & \text{当 } \theta_{f\Delta\sigma y}^i > c_{f\Delta}^i \text{ 且 } \Psi_{f\Delta}^i > 0, \\ -\Gamma_{f\Delta}^i \tilde{\Psi}_{f\Delta}^i, & \text{当 } \theta_{f\Delta\sigma y}^i < b_{f\Delta}^i \text{ 且 } \Psi_{f\Delta}^i < 0, \\ -\Gamma_{f\Delta}^i \Psi_{f\Delta}^i, & \text{其他.} \end{cases} \quad (23)$$

式中 $\Gamma_{f\Delta}^i$ 为 $\theta_{f\Delta\sigma y}^i$ 的自适应率, $1 \leq i \leq 2m$.

对 $\theta_{g\Delta\sigma y}$, 考虑 $\Omega_{g\Delta} = \{\theta_{g\Delta\sigma y} : b_{g\Delta}^i - \delta_{g\Delta}^i \leq \theta_{g\Delta\sigma y}^i \leq c_{g\Delta}^i + \delta_{g\Delta}^i\}$ ($1 \leq i \leq 2m$), $b_{g\Delta}^i, c_{g\Delta}^i$ 分别为相应被调参数距下限和上限 $\delta_{g\Delta}^i$ 的值, $\delta_{g\Delta}^i$ 为设计参数. 定义 $\Psi_{g\Delta}^i = e^T PB \frac{\partial \hat{g}_\Delta}{\partial \theta_{g\Delta\sigma y}} u_c$, $\Psi_{g\Delta}^i$ 为 $\Psi_{g\Delta}$ 的第 i 个分量, $\bar{\Psi}_{g\Delta}^i = (1 + \frac{c_{g\Delta}^i - \theta_{g\Delta\sigma y}^i}{\delta_{g\Delta}^i}) \Psi_{g\Delta}^i$, $\tilde{\Psi}_{g\Delta}^i = (1 + \frac{\theta_{g\Delta\sigma y}^i - b_{g\Delta}^i}{\delta_{g\Delta}^i}) \Psi_{g\Delta}^i$. 则抑制 $\theta_{g\Delta\sigma y}$ 漂移的修正算法为

$$\dot{\theta}_{g\Delta\sigma y}^i = \begin{cases} -\Gamma_{g\Delta}^i \bar{\Psi}_{g\Delta}^i, & \text{当 } \theta_{g\Delta\sigma y}^i > c_{g\Delta}^i \text{ 且 } \Psi_{g\Delta}^i > 0, \\ -\Gamma_{g\Delta}^i \tilde{\Psi}_{g\Delta}^i, & \text{当 } \theta_{g\Delta\sigma y}^i < b_{g\Delta}^i \text{ 且 } \Psi_{g\Delta}^i < 0, \\ -\Gamma_{g\Delta}^i \Psi_{g\Delta}^i, & \text{其他.} \end{cases} \quad (24)$$

式中 $\Gamma_{g\Delta}^i$ 为 $\theta_{g\Delta\sigma y}^i$ 的自适应率, $1 \leq i \leq 2m$.

抑制 K_{vsc} 漂移的修正算法为

$$\dot{\hat{K}}_{k_{vsc}} = \Gamma_{k_{vsc}} |e^T P B| \varphi - \sigma_{k_{vsc}} \hat{K}_{k_{vsc}} \quad (25)$$

4 实验分析 (Analysis of experiment)

为验证本文的控制算法,针对电液位置跟踪系统进行了实验研究,实验系统原理如图3所示,该系统的公称参数值如表1所示。

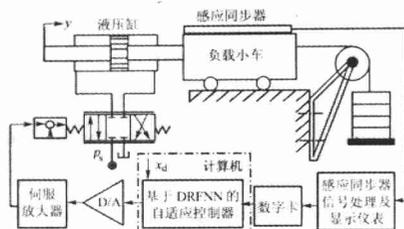


图3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment system

表1 电液位置跟踪系统公称参数值

Table 1 Nominal parameters of electro-hydraulic position tracking system

参数	数值	单位
$K_p K_v$	2.15×10^{-2}	m^3/V
β_e	7.0×10^8	Pa
V_t	6.52815×10^{-4}	m^3
K_{tr}	2.58×10^{-12}	m^4/kg
A	1.8606×10^{-3}	m^2
M	51.05	Kg
B_v	60×9.8	$N \cdot s/m$
ρ	860	Kg/m^3
K_L	0	N/m

经调试,DRFNN 被调参数的相关值如表2:
 $m = 5, \mu = 12, C = [200, 50, 6]^T, Q = \text{diag}(100, 100, 100)$, 隶属函数中心值 $\hat{x}_i^* = [-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2], \beta = g_0(x) = 1.1476 \times 10^6, f_0(x) = [0, -1.42 \times 10^5, -16.92]x$, 变结构控制增益相关参数为 $\sigma_{k_{vsc}} = 100, K_{vsc}(0) = [1.6 \times 10^4, 10^4]^T, \Gamma_{k_{vsc}} = \text{diag}(6 \times 10^4, 6 \times 10^4)$; 由图1可知,结构层权值均为零时,DRFNN 退化为传统模糊神经网络,故 w_j^1 和 w_g^1 各元素初值可设为零, $M_{w_j^1} = 10, M_{w_g^1} = 5, \gamma_{j\Delta} = 20, \gamma_{g\Delta} = 10; x(0) = [0, 0, 0]^T, y_d(t) = 150 + 100\sin(0.1\pi t)$ mm 时,不同油源压力和外负载力下的实验结果如图4。

图4表明,系统在一个周期内便能跟踪期望轨迹。主要原因为:1)DRFNN 仅辨识系统未知规律部

分,搜索范围小;2)模糊神经网络权值的物理意义明确,其初值比较接近实际值。

由图4可知,液压缸以150 mm处为中心作正弦运动时,各控制输入 u 并不对称于0V线,这是本文基于DRFNN的自适应控制器对伺服阀因制造装配造成的阀芯位置误差进行补偿的缘故。比较图4(a)和图4(c)可知,系统存在较大的负载力干扰时,系统的跟踪精度没有受到影响,但由于系统此时的不确定性因素增强,使得变结构控制项引起的颤振幅值高,说明了本文基于DRFNN的自适应控制算法能根据系统不确定性界的大小自动调节变结构控制增益,克服了传统变结构控制需知道系统不确定性的界以及为确保系统鲁棒性选取保守的变结构控制增益而增加实现难度的缺陷,另一方面,当系统存在负载力干扰时,液压缸拉负载的行程中,控制输入 u 的幅值比没有负载的情况大,而液压缸推负载的行程中,控制输入 u 的幅值比没有负载的情况小,这是本文基于DRFNN的自适应控制器对负载干扰进行补偿的结果。

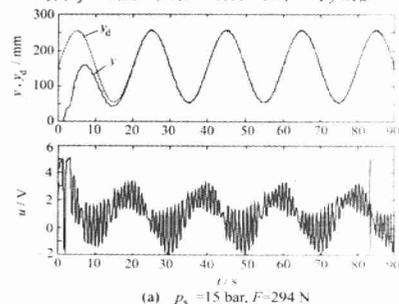
比较图4(b)和图4(c)可知,系统油源压力的变化也不影响系统的跟踪精度,且系统油源压力增加,系统控制输入幅值相应减小,与实际完全吻合,进一步说明本文基于DRFNN的自适应控制算法自适应功能的有效性,使系统具有较强的鲁棒性。

表2 用于DRFNN参数估计的参数

Table 2 Parameters for estimating DRFNN's parameter

估计量	上限 $c_{* \Delta}$	下限 $b_{* \Delta}$	初始值	自适应率	$\hat{\sigma}_{* \Delta}$
$\sigma_{j\Delta}^1$	0.1058	0.0522	0.079	0.01	0.02
$\sigma_{g\Delta}^1$	0.1058	0.0522	0.079	0.05	0.02
$y_{j\Delta}^1$	10^5	-10^5	0	6×10^5	100
$y_{g\Delta}^1$	10^7	0	10^6	10^6	100

表中 $j = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, m; \#$ 为 f 或 g



(a) $p_s = 15 \text{ bar}, F = 294 \text{ N}$

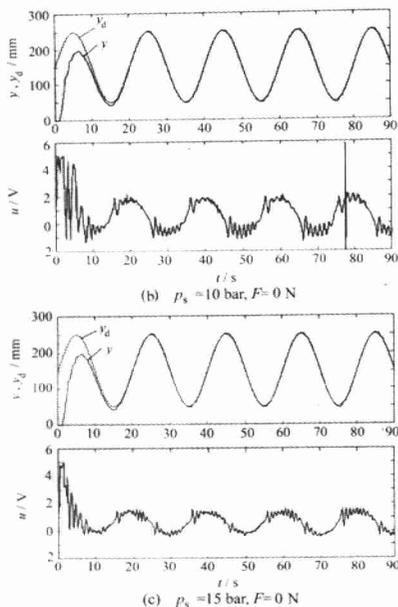


图4 系统的跟踪响应和控制输入
Fig. 4 Tracking response and control input of system

5 主要结论 (Main conclusion)

1) 实验结果表明:基于 DRFNN 的自适应控制器能对系统参数不确定性和负载干扰具有自适应补偿作用,使电液位置跟踪系统具有较强的鲁棒性和良好的跟踪性能;

2) 用 DRFNN 仅对电液位置跟踪系统的未知规律部分进行在线估计,缩小了搜索空间;同时模糊系统的集成,使网络权值的物理意义明确,可确定接近实际值的初值,因此,系统的建模精度和收敛速度可以得到提高;

3) 变结构控制增益根据在线估计的模糊神经网络建模误差的界自动调节,可用较小的控制量获得同样的系统鲁棒性;

4) 用 DRFNN 对电液位置跟踪系统的有关函数进行在线估计时,系统各状态间的动态关系被辨识在 DRFNN 内,只需系统的一个状态变量作为其输入,避免了输入个数增加而带来的网络结构膨胀及计算负担,加快了收敛速度。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO Tianan, VIRALO Tapio. Development of fuzzy state controller and its application to a hydraulic position servo [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, 70(2): 213 - 221.
- [2] 何玉彬, 李新忠. 神经网络控制技术及其應用 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
(HE Yubin, LI Xinzhong. *Neural Network Control Technology and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2000.)
- [3] KNOHL T, UNBEHAUEN H. Adaptive position control of electrohydraulic servo systems using ANN [J]. *Mechatronics*, 2000, 10(1): 127 - 143.
- [4] BONCHIS A, CORKE P I, RYE D C, et al. Variable structure methods in hydraulic servo systems control [J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 589 - 595.
- [5] FUNG Rongfeng, YANG Rongtai. Application of VSC in position control of a nonlinear electro-hydraulic servo system [J]. *Computers & Structures*, 1998, 66(4): 365 - 372.
- [6] ROVITHAKIS G A, CHRISTODOULOU M A. Adaptive control of unknown plants using dynamical neural networks [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(3): 400 - 412.
- [7] WANG Weiyen, LEU Yihguang, HSU Chenchien. Robust adaptive fuzzy-neural control of nonlinear dynamical system using generalized projection update law and variable structure controller [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 2001, 31(1): 140 - 147.
- [8] CHANG Yeong-Chan. Adaptive fuzzy-based tracking control for nonlinear SISO systems via VSS and H_∞ approached [J]. *IEEE Trans on Fuzzy System*, 2001, 9(2): 278 - 292.

作者简介:

张友旺 (1969—), 男, 博士研究生, 副教授, 1996年毕业于哈尔滨工业大学, 并获得该校流体传动及控制专业硕士学位, 从事自适应模糊控制、神经网络控制、液压伺服系统等研究, E-mail: yzwang@mail.csu.edu.cn;

桂卫华 (1950—), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代鲁棒控制、复杂过程建模与优化控制等研究, E-mail: gw@mail.csu.edu.cn;

赵泉明 (1978—), 男, 研究方向为计算机控制工程, E-mail: czhaosqm@yahoo.com.cn.