

【文章编号】 1004-1540(2005)03-0199-04

神经网络变结构在液压伺服系统控制中的应用

黄镇海, 钟绍俊, 谢敏, 郭振武

(中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 采用神经网络对液压伺服系统进行离线辨识, 然后用神经网络的逆模型抵消伺服阀的死区非线性, 再用离散变结构控制器对液压伺服系统的线性部分进行控制, 从而达到良好的控制效果。

关键词 神经网络; 离散变结构控制; 死区非线性

中图分类号 TP183

文献标识码 A

Neural networks and variable structure controller applied in hydraulic servo systems

HUANG Zhen-hai, ZHONG Shao-jun, Xie Min, GUO Zhen-wu

(College of Electrical & Mechanical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Asatisfactory result is achieved by applying a neural network to identify the plant down-line, by then using an inverse of the dead zone nonlinear for compensation, and finally by using discrete variable structure controller to control the linear part. We use an ANN instead of an inverse of the dead zone nonlinear.

Key words: neural network; discrete variable structure control; dead zone nonlinear

1 液压伺服系统的数学模型及其辨识

液压伺服系统的数学模型可以简化为一个带伺服阀摩擦死区非线性环节和一个线性的三阶系统相串联而成. 其中, 伺服阀摩擦死区非线性通常不随时间变化而变化, 是静态的^[1]. 其简化结构图(图 1).

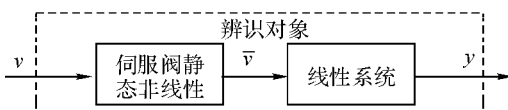


图 1 液压伺服系统模型

伺服阀死区非线性可以用一下方程来描述

$$\bar{v} = \begin{cases} f_1(v) & v > U_1 > 0 \\ 0 & U_1 \geq v \geq U_2. \\ f_2(v) & 0 > U_2 > v \end{cases} \quad (1)$$

v, \bar{v} 分别为伺服阀的输入和输出. 液压伺服系统的线性部分离散化模型如下:

$$\frac{Y(z^{-1})}{\bar{v}(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}}. \quad (2)$$

电液伺服系统离散模型输入 / 输出关系如下式表示:

$$y(k) = - \sum_{i=1}^3 a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^3 b_i \bar{v}(k-i). \quad (3)$$

其中, a_i 和 b_i 是线性系统的系数, \bar{v} 是非线性环节的输出。

利用神经网络能够拟合任意非线性特性, 我们设计了一个带 RBF 神经网络的辨识器(图 2)用以代替该对象的死区非线性部分, 对液压伺服系统数学模型进行了辨识^[2]。

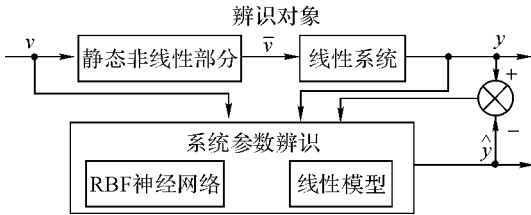


图 2 液压伺服系统辨识结构图

利用 RBF 神经网络 ANN1 的输出层具有线性映射关系的性质, 用一个单数入 / 单输出的 RBF 神经网络 ANN1 来代替伺服阀静态非线性环节, 于是可以将 \bar{v} 写成:

$$\bar{v} = \omega_0 v(k) + \sum_{j=0}^m \omega_j \phi(v(k) - c_j). \quad (4)$$

其中, m 是隐层神经元的个数,

$$\phi_N = \begin{bmatrix} y(3) & \cdots & y(1) & v(4) & \cdots & v(1) & x_1 & \cdots & x_m(4) & \cdots & x_m(1) \\ y(4) & \cdots & y(2) & v(5) & \cdots & v(2) & x_1 & \cdots & x_m(5) & \cdots & x_m(2) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ y(N+2) & \cdots & y(N) & v(N+3) & \cdots & v(N+1) & x_1 & \cdots & x_m(N+3) & \cdots & x_m(N+1) \end{bmatrix},$$

$$\tilde{y} = [y(4), y(5), \dots, y(N+3)]. \quad (7)$$

则有

$$\hat{p} = (\phi_N^T \phi_N)^{-1} \phi_N^T \tilde{y}. \quad (8)$$

辨识参数的个数是 $3 + (3+1)p(m+1)$, 下一步就是确定线性系统的 7 个参数和从 \hat{p} 确定 m 个权值。

参数 $\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_3, \hat{b}_0, \dots, \hat{b}_3$ 可从 \hat{p} 直接得到:

$$\hat{a}_i = -\hat{p}_i \quad (i = 1, \dots, 3)$$

$$\hat{b}_j = \hat{p}_{j+4} \quad (j = 0, \dots, 4)$$

而网络的权值可以由估计值 $\beta_{01}, \dots, \beta_{3m}$ 利用下式计算出

$$\hat{\omega}_j = \frac{\sum_{i=0}^3 \beta_{ij} \bar{b}_i}{\sum_{i=0}^3 \bar{b}_i^2}. \quad (9)$$

$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\lambda^2}\right)$, c_j 为径向基函数的中心, $\omega_0 = 1$. 由此得:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^3 a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^3 b_i \omega_0 v(k-i) + \sum_{i=0}^3 \sum_{j=1}^m b_i \omega_j \phi(v(k-i) - c_j). \quad (5)$$

定义变量

$$\beta_{ij} = b_i \omega_j,$$

$$x_0(k) = v(k),$$

$$x_j(k) = \phi(v(k) - c_j),$$

则, 式可表示为:

$$y(k) = -\sum_{i=1}^3 a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^3 \beta_{ij} x_j(k-i). \quad (6)$$

为方便应用辨识算法, 将上式改写为:

$$y(k) = m^T(k) p + \epsilon(k).$$

其中:

$$m^T(k) = [y(k-1), \dots, y(k-1), x_0(k), \dots, x_0(k-3), \dots, x_m(k), \dots, x_m(k-3)],$$

$p^T = [-a_1, \dots, -a_3, \beta_{00}, \dots, \beta_{30}, \dots, \beta_{0m}, \dots, \beta_{3m}] \epsilon(k)$. 是误差序列, 为白噪声。

采用最小二乘法进行离线辨识。

定义:

2 控制器的设计

根据辨识得到的神经网络 ANN1 的网络权值参数果, 再用一个 RBF 网络 ANN2 来拟合死区非线性的逆, 把这个逆模型与系统串连就可以抵消系统的非线性部分^[3,4]。再根据辨识出来的线性部分的参数, 来设计变结构控制器, 以克服线性部分参数摄动引起的不良影响, 从而达到较理想的控制效果。控制器的设计(图 3), 定义 w 为给定信号, u 为控制量, d 为外加扰动, v 为伺服阀输入和 y 为伺服系统的位置输出, 逆模型神经网络的学习是采用离线方式进行的。

神经网络 ANN2 的结构与 ANN1 相似, 设计过程不再叙述。下面主要就线性部分设计其变结构控制器。

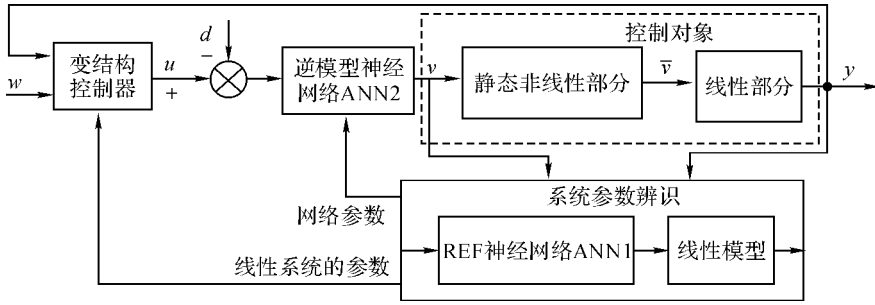


图 3 神经网络变结构控制器

根据辨识结果得到系统线性部分的离散模型,将其转换成离散状态方程^[5]:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= F_a x(k) + bu(k) + \bar{b} \bar{u}(k) \\ y(k) &= F_c x(k). \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $F_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{bmatrix},$

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_3 & b_2 \end{bmatrix}, F_c = [0 \quad 0 \quad 1].$$

$$\begin{aligned} x(k) &= [x_1(k) \quad x_2(k) \quad x_3(k)]^T, \\ x_1(k) &= y(k-2), x_2(k) = y(k-1), \\ x_3(k) &= y(k), \\ \bar{u}(k) &= [u(k-2) \quad u(k-1)]^T. \end{aligned}$$

现设计 VSC 使得系统输出稳态无差地跟踪阶跃参考输入,且对系统的外部扰动具有鲁棒性^[2].

设其滑模切换面为:

$$S(k) = c_1 x_1 + c_2 (x_2 - K_I \omega(k)) + x_3, \quad (11)$$

控制律为: $u(k) = u_e(k) + \Delta u(k)$, $u_e(k)$ 定义为满足 $S(k+1) = 0$ 时对应的控制. 当 $u_e(k)$ 和 $u(k)$ 满足下方法确定时,滑态可达性条件得到满足.

$$u_e(k) = \left\{ -\bar{b}_n^T(k) + c_2 K_I (\omega(k) + T(r(k-1) - x_2(k))) + a_n x_1 - \sum_{i=2}^3 (c_{i-1} - a_{4-i}) x_i \right\} / b_1,$$

$$\Delta u(k) = - \sum_{i=1, i \neq n-1}^n \Phi_i x_i - \Phi_{n-1} (x_{n-1} - K_I \omega). \quad (12)$$

其中:

$$\Phi_i = \begin{cases} \Delta_k \text{sign}(S_k(x_i - K_I \omega) b^T C - g_i(k)), \\ 0, \end{cases}$$

$$\left| S_k x_i(k) b^T C \right| > g_i(k).$$

$$\left| S_k x_i(k) b^T C \right| \leq g_i(k) \quad (i \neq 2)$$

$$\Phi_2 = \begin{cases} \Delta_k \text{sign}(S_k(x_2 - K_I \omega) b^T C - g_2(k)), \\ 0, \end{cases}$$

$$\left| S_k(x_2(k) - K_I \omega) b^T C \right| > g_2(k),$$

$$\left| S_k(x_2(k) - K_I \omega) b^T C \right| \leq g_2(k).$$

$$0 < \Delta_k < |S_k|$$

$$\left| b^T C \left(\sum_{j=1, j \neq 2}^n |x_j(k)| + |x_2(k) - K_I \omega(k)| \right) \right|$$

$$g_j(k) = \Delta_k (b^T C)^2 |x_i(k)|$$

$$\left(\sum_{j=1, j \neq 2}^3 |x_j(k)| + |x_2(k) - K_I \omega(k)| \right), j \neq 2;$$

$$g_2(k) = \Delta_k (b^T C)^2 |x_i(k)|$$

$$\left(\sum_{j=1, j \neq 2}^3 |x_j(k)| + |x_2(k) - K_I \omega(k)| \right)$$

$$\omega(k+1) = \omega(k) + T(r(k-1) - x_{n-1}(k)).$$

式中 T 为采样周期, K_I 为积分器的增益.

C 和 K_I 的选择原则为使特征方程: $\lambda^3 + \lambda^2(c_2 - 1) + \lambda(c_1 - c_2) - c_1 = 0$ 具有指定的特征根.

3 仿真研究

对液压伺服系统进行辨识,给定位置信号 $v = 2\sin(5t)$,对于 ANN1 取 $m = 11, \lambda = 5$, $c = [c_1, c_2, \dots, c_m] = [-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]$.

伺服阀的死区非线性特性(图 4). 系统实际输出信号和拟合模型输出信号(图 5),图 5(a) 是采用递推最小二乘法进行辨识,图 5(b) 是采用最小二乘法进行辨识的结果.

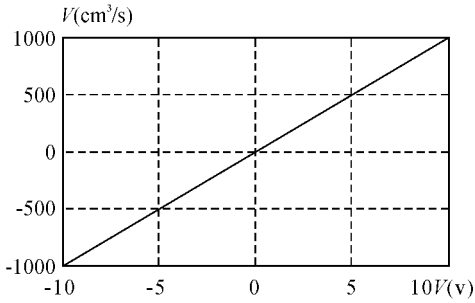


图 4 伺服阀死区非线性

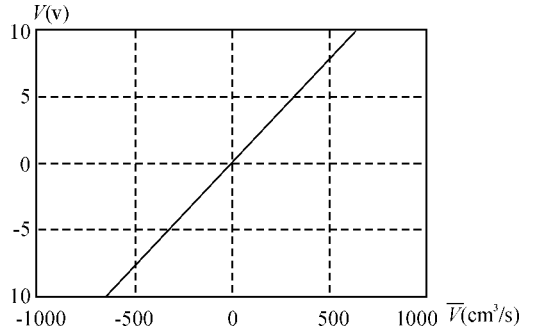
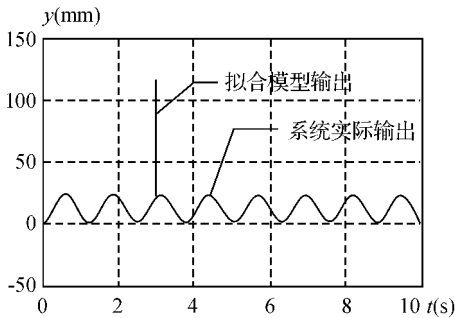


图 6 神经网络 ANN2 拟合 ANN1 逆输出图



a. 采用递推最小二乘法进行辨识

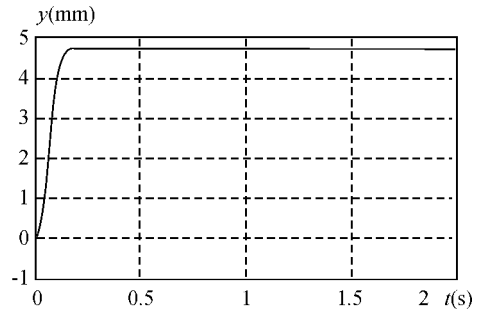
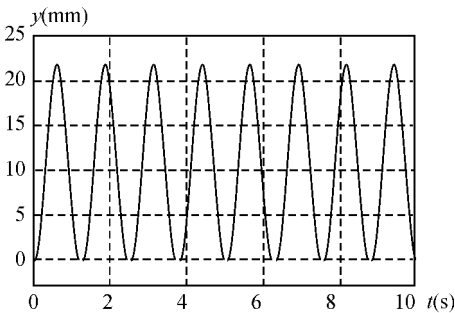


图 7 不带神经网络 ANN2 时系统的仿真图



b. 采用最小二乘进行辨识

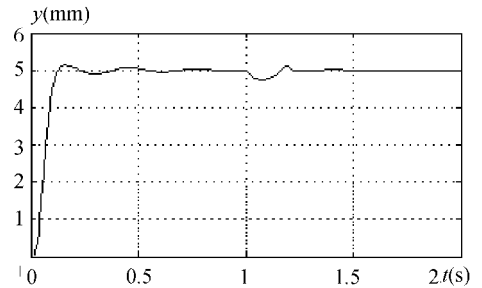


图 8 带神经网络 ANN2 时系统的仿真图

图 5 系统实际输出及拟合模型输出

神经网络 ANN2 拟合液压伺服系统死区非线性的逆模型如图 6。

当系统中无逆神经网络 ANN2 时,系统仿真结果(图 7). 可以看出由于伺服阀死区非线性的存在,系统最终存在着一定的稳态误差. 对被控对象在带逆神经网络 ANN2 和变结构控制器的控制下,在 1 秒时加 $d = 0.2 \text{ V}$ 的恒值扰动时,系统仿真结果(图 8),由于逆神经网络 ANN2 对死区非线性的补偿,系统最终无稳态误差. 另外,由于变结构控制器具有较强的鲁棒性,控制系统在对象结构参数有一定变化时系统仍有较好的控制特性.

4 结 论

对于液压伺服系统这样一个存在非线性和较大的参数摄动的被控对象,利用神经网络的良好非线性特性,对液压伺服系统进行离线辨识(文献[1]采用了在线辨识和二次型最优的方法进行控制),然后用神经网络的逆模型抵消伺服阀非线性,再用一个离散变结构控制器对液压伺服系统的线性部分进行控制,充分利用了变结构控制抵抗被控对象参数摄动的特性,从而既减少由于在线辨识造成的时间上的浪费和消除了辨识过程中

(下转第 211 页)

的两条“辫状”部分与分形的主体部分是连通的。

证明 若不然,假定在某处存在一间断. 则存在从 z' 到 z'' 的连续曲线,函数 $f(x,y)$ 在其上不变号(图6). 但这与(16),(17)式矛盾. 证毕.

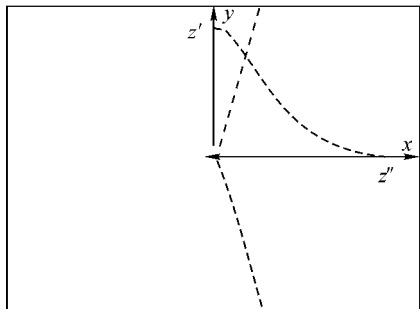


图6 定理2.3证明示意图

3 结束语

分形作为一个新兴的领域正在获得越来越广泛的应用. 仅在图形学方面已形成了所谓的分形图形学,并派生了分形艺术和分形的自然景物模拟等,其它众多的应用参见文献^[5]. 总之,分形的应用将随着分形研究的深入而日益扩大. 本文对

复 Carotid-Kundalini 函数产生的分形集获得了与 Julia 分形集, Mandelbrot 分形集不同的一些性质,尤其是其无界性是与众不同的性质,并得到了证明. 这些定理的建立是分形理论及其应用中必然具有其应有的意义和价值.

关于 Julia-CK 分形集,还有许多问题尚待研究,比如,为什么 Julia-CK 分形集的主部(见图2)与 Mandelbrot 分形十分相似? 除定理2.1指出的无界分形外,还有什么 Julia-CK 分形是无界的? 比如,图3的分形是有界还是无界的?

这些问题的解决将具有重要的理论价值.

【参 考 文 献】

- [1] GORDON C, JULIA R J. Sets of the complex Carotid-Kundalini function[J]. Computers & Graphics, 2001, 25: 153-158.
- [2] SPEIGEL M R. Theory and problems of complex variables [M]. New York: McGraw Hall, 1972.
- [3] 孙燮华. 关于由映射 $z \leftarrow 1/z^n$ 发生的分形[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(1): 94-95.
- [4] 孙燮华. 高阶 Mandelbrot 分形图和轴对称性[J]. 中国计量学院学报, 1999, 10(1): 1-5.
- [5] 王东生, 曹磊. 混沌分形及其应用[M]. 北京: 中国科技大学出版社, 1995.

(上接第202页)

局部的不准确性,同时又能满足控制系统稳、准、快的要求.

【参 考 文 献】

- [1] 孙文质. 液压伺服控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [2] KNOHL T, UNBEHAUEN H. Adaptive Position Control

of Electro Hydraulic Servo System Using ANN [J]. Mechatronics, 2000(10): 127-143.

- [3] 刘兴华, 刘宪英, 胡泽. 基于 RBF 神经网络系统辨识研究[J]. 现代电子技术, 2004, 24: 191.
- [4] 李秀英, 韩志刚. 非线性系统辨识方法的新进展[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(10): 5-7
- [5] 李运华, 王孙安. 离散变结构控制的新方法及其在液压伺服系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(5): 611-616.