基于Wiener模型的混沌系统辨识研究*

田彦涛 徐 明 陆佑方 陈关荣
(吉林工业大学控制科学与工程系 长春 130025) (休斯顿大学电机工程系)

摘 要 提出一种基于Wiener模型辨识混沌系统的新方法。该方法利用三层前馈神经网络来辨识Wiener模型中的静态非线性环节和学习混沌系统的内在规律性。同时给出了辨识混沌系统的结构和网络权值调整的学习算法。对Henon系统的仿真结果表明, 该方法是有效的。

关键词 混沌系统, Wiener模型, 混沌辨识
分类号 TP 27

Study of Chaos Identification Based on Wiener Model

Tian Yantao, Xu Ming, Lu Youfang *Chen Guanrong*
(Jilin University of Technology) (University of Houston)

Abstract A new identification structure of chaotic system is presented based on Wiener model. Three - layer feedforward neural network is used to identify nonlinear static subsystem of Wiener model and learn intrinsic feature of chaotic system. The identification structure of chaotic system and learning algorithm of neural network are both given. The simulation of Henon system shows that the identification structure works well.

Key words chaotic system, Wiener model, chaos identification

1 引 言

混沌是自然界与人类社会普遍存在的运动形态。自著名的OGY方法提出之后, 混沌系统的辨识、控制与同步受到人们越来越多的关注[1-6]。

人工神经网络具有自学习、自组织和逼近任意非线性映射的能力。目前, 将神经网络技术应用于混沌系统的研究正方兴未艾。文献[4]探讨了简单神经网络结构在混沌系统辨识和控制中的应用问题。文献[5]基于Hammerstein模型对混沌系统的辨识问题进行了研究。

本文采用基于Wiener模型的一种新的辨识结构来辨识混沌系统。利用三层前馈神经网络来辨识Wiener模型中的非线性环节, 通过合适的选择来获得Wiener模型中的线性子系统。由于三层前馈神经网络具有逼近任意连续非线性映射和处理系统内在的难以解析表达的规律性的能力, 从而可以达到辨识混沌系统的目的。

2 基于Wiener模型的混沌系统的辨识结构

Wiener模型由动态线性子系统与一个无记忆非线性环节串联而成。该模型的优点是能将系统的动态复杂性与非线性复杂性相分离。在Wiener模型中, 无记忆非线性环节体现出非线性的复杂性, 而动态复杂性则存在于线性子系统中。如果能将混沌系统的非线性复杂性与动态复杂性进行分离, 将有助于对混沌系统的分析与控制。最直观的想法是通过对线性子系统施加影响, 以此达到对全局混沌的控制。

在Wiener模型结构中, 采用一个三层多神经元的前馈神经网络来辨识非线性环节, 通过选择一个简单的与系统同维的线性系统来完成线性动态系

* 国家自然科学基金项目(59675043)和机械部科技发展基金项目(9825044
1998-05-18收稿, 1998-08-10修回

统。其辨识结构如图 1 所示。

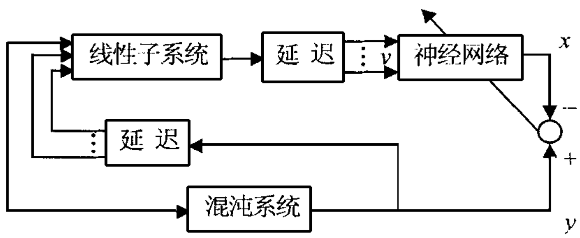

图 1　基于Wiener 模型的混沌系统的辨识结构

3　神经网络权值的调整与线性子系统的选择

采用图 2 所示的三层前馈神经网络来逼近Wiener 模型中的静态非线性环节。该网络的隐层和输出层的激活函数分别选为S 型函数和线性函数, S 型函数取 $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$, 线性函数为 $f(x) = x$。输入常数 -1.0 用于平衡偏置。

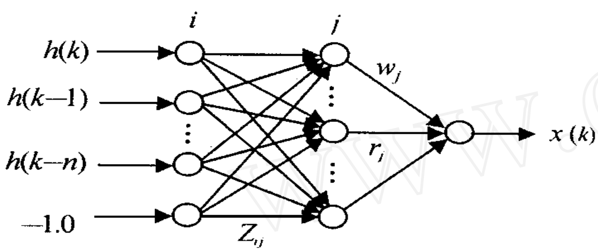

图 2　三层前馈神经网络结构

根据图 2 的有关记号, 有

$$x = \sum_{j=1}^{H_N} w_j r_j \tag{1}$$

$$r_j = f\left(\sum_{i=0}^{n+1} z_{i,j} v_i\right) \tag{2}$$

其中, H_N 为隐层神经元数目, v_i 为神经网络的输入, 取值为

$$v_i = \begin{cases} h(k-i), & i = 0, 1, \cdots, n \\ -1.0, & i = n+1 \end{cases} \tag{3}$$

w_j, $z_{i,j}$ 是加权系数。

假设外部参考输入为零时,Wiener 模型中线性子系统可用动力学方程

$$h(k) = \sum_{i=1}^{n} a_i h(k-i) \tag{4}$$

描述。线性子系统(4) 的选择原则是简单且与待辨识混沌系统具有相同的维数。如果已知混沌系统的维数, 若事先不知待辨识混沌系统的维数, 则可通过逐步增加线性子系统维数的方法来进行。仿照文献[5], 选择参数 a_i 使系统(4) 完全可控。

神经网络权值的调整过程是使如下目标函数最小。

$$J = \frac{1}{2}(y(k) - x(k))^2 \tag{5}$$

对混沌系统进行辨识的过程, 就是使Wiener 模型的输出逼近混沌系统输出的过程。由于Wiener 模型中线性子系统的参数事先已给定, 所以辨识算法就是三层前馈神经网络的权值调整算法。可用常规的BP 算法来调整权值, 但由于常规BP 算法在学习过程中收敛缓慢且易发生振荡, 故采用如下的改进算法。

$$\theta(k) = \theta(k+1) + \rho(k)[(1-\eta)D(k) + \eta D(k-1)] \tag{6}$$

式中

$$\rho(k) = 2^{\lambda}\rho(k-1)$$

$$\lambda = \mathrm{sgn}[D(k)D(k-1)]$$

$$D(k) = -\Delta(k)\frac{\partial x(k)}{\partial\theta(k-1)}$$

$$\Delta(k) = y(k) - x(k)$$

$$\frac{\partial x(k)}{\partial\theta(k-1)} = \begin{cases} r_j, & \theta(k-1)\ \text{is}\ w_j \\ w_j r_j(1-r_j)v_i, & \theta(k-1)\ \text{is}\ z_{i,j} \end{cases}$$

其中, η 为动量项因子, ρ 为学习速率, $i = 0, 1, \cdots, n+1$, $j = 1, 2, \cdots, H_N$。

4　数值仿真

采用一个典型的混沌系统 ——Henon 系统作为研究对象。Henon 系统的动力学方程为

$$y(k+1) = -py^2(k) + qy(k-1)$$
$$k = 1, 2, \cdots \tag{7}$$

当参数 $p = 1.4$, $q = 0.3$ 时, Henon 系统将处于混沌状态, 其混沌吸引子如图 3 所示。

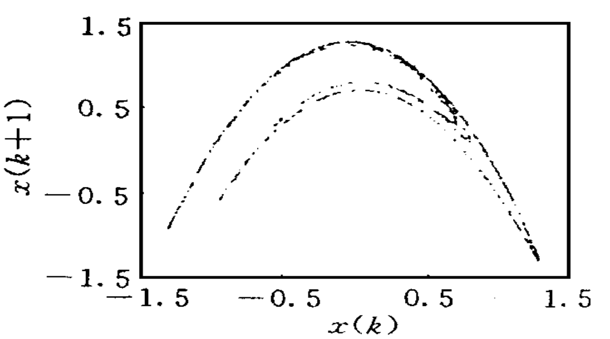

图 3　Henon 系统的混沌吸引子

采用 4 × 30 × 1 的三层前馈神经网络来逼近Wiener 模型中的非线性环节, 线性子系统选为

$$x(k+1) = ax(k) + bx(k-1) \tag{8}$$

经过多次仿真实验, Henon 系统的 a, b 取值分别为 0.3 和 0.01。取 1 000 个样本, 经过学习后, 辨识模型输出的吸引子如图 4 所示。

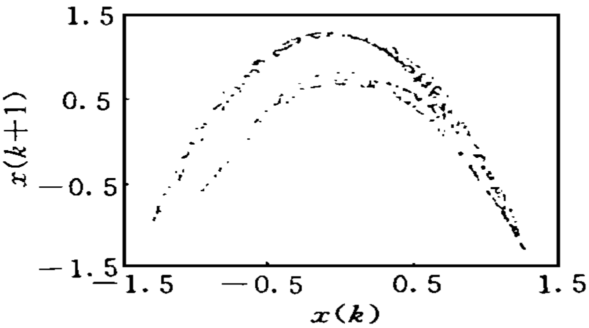

图 4 辨识模型的吸引子

为说明辨识模型已很好地逼近混沌系统, 现来计算辨识模型输出的最大 Lyapunov 指数。Lyapunov 指数能定量刻画有关动力系统对初始条件的敏感依赖性, 体现出奇异吸引子按指数律分岔的特点, 正的 Lyapunov 指数的存在与否可以判定系统是否达到混沌性态。

定义 1 对一维映象的一条轨迹, $x_0, x_1 = f(x_0), \cdots, x_n = f(x_{n-1}), \cdots$, 以初值 x_0 加一微小扰动 δx_0 为初值的映象轨迹, 经 n 步后与原轨迹的偏差为

$$\delta x_n = f'(x_{n-1}) f'(x_{n-2}) \cdots f'(x_0)\, \delta x_0 \tag{9}$$

则

$$\lambda = \lim_{\delta x_0 \to 0} \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \log \left| \frac{\delta x_n}{\delta x_0} \right| = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \log |f'(x_i)| \tag{10}$$

称为 Lyapunov 指数。

采用文献[7]提出的从时间序列中提取最大 Lyapunov 指数的方法, 可知辨识模型输出序列的最大 Lyapunov 指数为 0.415 2。而原系统为 0.416 9。可见辨识系统已处于混沌状态, 且最大 Lyapunov 指数相差不大。

5 结 语

混沌是确定性系统内秉的随机, 其内部有着确定的规律性。这种规律性难于解析表达, 而人工神经网络具有逼近任意非线性连续映射和处理复杂信息的能力。另外, Wiener 模型具有将非线性复杂性与动态复杂性分离的特点, 使得分析复杂系统的工作变得相对简单。本文结合了神经网络和 Wiener 模型的优点, 用于对混沌系统的辨识。数值实验结果表明, 该方法是可取的。

参 考 文 献

1 Carroll T L, Pecora L M. Synchronizining chaotic circuits. IEEE Trans on Circ Syst, 1991, 38(5): 453-456

2 Chen G, Dong X. On feedback control of chaotic nonlinear dynamical systems. Int J Bifur Chaos, 1992, 2(2): 407-411

3 Ogorzalek M J. Taming chaos: Parts I & II. IEEE Trans on Circ Syst, 1993, 40(8): 693-706

4 Chen G, Dong X. Identification and control of chaotic system: An artificial neural network approach. In: Proc of the IEEE Int'l Symp on Circ Syst. Seattle, 1995. 1177-1182

5 Chen G, Chen Y, Ogmen H. Identifying chaotic system via a Wiener-type cascade model. IEEE Contr Syst, 1997, 8(1): 29-36

6 陈关荣. 控制非线性动力学系统的混沌现象. 控制理论与应用, 1997, 14(1): 1-6

7 Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series. Physics Letters A, 1994, 185(1): 77-87

作 者 简 介

田彦涛 男, 1958 年生。吉林工业大学信息科学与工程学院院长, 教授, 博士生导师。主要研究领域为不确定复杂系统的建模与控制, 混沌动力学理论。

徐 明 男, 1973 年生。吉林工业大学控制科学与工程系硕士研究生。研究方向为混沌的生成、辨识、控制与同步, 模糊逻辑和神经网络理论在混沌系统中的应用。

陆佑方 男, 1936 年生。1962 年毕业于清华大学工程力学研究生班, 现为吉林工业大学理学院教授。主要研究方向为柔性多体系统动力学与控制等。

陈关荣 男, 1948 年生。美国休斯顿大学教授, 博士, IEEE 高级会员。主要研究方向为现代非线性控制理论方法及其应用, 以及相关研究领域。