

# 热力系统传感器故障检测的动态神经网络方法

马 涛, 徐向东

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

**摘 要:**采用动态神经网络状态观测器的故障检测和诊断方法对非线性时变热力系统状态进行估计。通过对延时神经网络和动态递归神经网络在热水锅炉模型上的仿真试验,表明,基于动态神经网络状态观测器的热力系统传感器检测和诊断方法是可行的。经过仿真试验对比,延时 RBF 网络具有比较好的推广能力。该方法在青岛煤气公司自控系统中的应用证实了其可靠性。

**关 键 词:**动态神经网络; 故障检测; 传感器

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## 1 前 言

在以现代控制理论为基础发展而来的线性系统故障检测和诊断理论中,主要采用状态观测器的方法检测和诊断传感器的故障,该方法在实际应用中的瓶颈问题就是如何设计非线性系统状态观测器。对热力系统复杂的非线性系统,上述方法存在以下的一些难题:一方面,此方法对模型误差比较敏感;另一方面,由于只对线性模型和非常特殊的非线性模型存在状态观测器设计方法,在对热力系统这样复杂的非线性系统采用此方法时候必须对模型进行简化,存在较大的模型误差。

神经网络具有自学习,能拟合任意连续非线性函数和并行处理的能力,在处理非线性问题和在线估计方面具有很强的优势。与传统非线性辨识方法不同,神经网络辨识不受模型结构的限制,不需要知道输入和输出之间存在的数学关系,只需通过样本的学习掌握数据之间的关系,从而解决了非线性系统状态观测器构造的难题,实现基于神经网络状态观测器的传感器故障检测和诊断。此方法不但具有状态观测器方法可以恢复故障信号的特点,而且由于神经网络通过实际数据训练得到,而不需要系统的数学模型,因此对复杂的非线性系统也适用。

神经网络故障检测和诊断方法多数采用前馈

网络,训练方法采用 BP 方法或者 BP 方法的改进。但是 BP 网络是静态网络,不具备模拟动态过程的能力。目前的应用主要集中在故障的模式分类领域。由于热力系统是一个复杂的非线性系统,具有大惯性、大滞后、不确定和时变等特点,如果不考虑惯性和时滞对热力系统动态特性的影响,所得到的神经网络状态观测器的误差将非常大。因此,应当提出采用动态神经网络状态观测器的故障检测和诊断方法。

## 2 动态神经网络

如何利用热力系统的冗余关系,是传感器故障检测和诊断方法的主要工作。对于线性系统,一般采用卡尔曼滤波器的方法来构造状态观测器。但是这种方法只能应用于线性系统和特定的非线性系统。在系统结构未知的情况下,或对于复杂的非线性系统,只能利用近似模型代替,而近似模型存在建模误差和时变误差,因此难以取得良好的效果。

由于热力系统参数的变化非常缓慢,热力系统可以用如下的纯时滞定常非线性模型表示:

$$\begin{cases} \dot{x} = f[x, u(t-p)] \\ y = g(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u$  为  $m$  维系统输入,  $y$  为  $n$  维系统输出,  $x$  为系统状态,  $f(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$  为非线性函数。可以得到任意传感器的输出与之前  $P$  时间段的系统输入和传感器输出之间存在某一函数关系。在  $k$  时刻,利用前  $P$  时间段的系统输入和传感器输出可以预测下一时刻任一传感器的输出,即所谓的解析余度。也就是动态系统通过引入延迟单元延拓为静态函数,可以采用静态神经网络的方法训练动态神经网络和反向传播(back propagation, BP)网络或者径向基函数(radial basis function, RBF)网络。对于延时神经网络,其本质还是一个静态网络,训练方法比较成熟。但是由于必须将输入、输出延时展开,其网络规

模巨大,对训练算法的要求比较高。

与前馈网络不同,动态递归神经网络是一种将前馈网络的隐节点或输出节点上的值反馈到前一层节点上或者在本层节点上进行自反馈的网络结构。动态递归网络又分为全反馈和部分反馈两种网络形式。全反馈网络具有任意的前馈和反馈连接,且所有连接权都可以进行修正。而在部分递归网络中,前馈连接权可以修正,反馈连接由一组所谓的联系单元构成,连接权不可修正。结构单元记忆隐含层的过去状态,并在下一时刻连同网络输入一起作为隐含层单元的输入,从而使部分递归网络具有动态记忆能力。比较简单的部分动态递归网络有 Elman 网络和 Jordan 网络。在动态递归网络中,Elman 网络结构(如图 1 所示)最为简单,其隐含层输出反馈到输入层,网络规模要明显小于延时神经网络,已经开始被应用在动态系统辨识中。

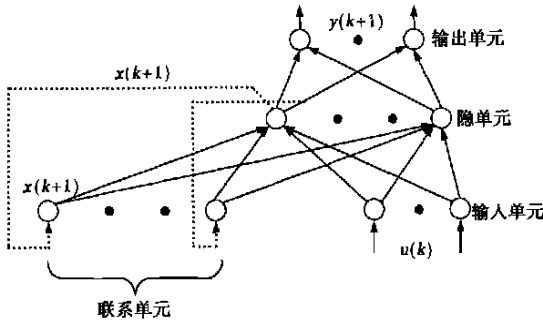


图 1 Elman 网络

### 3 仿真研究

仿真实验工作在某热水锅炉模型上进行,模型由锅炉和热网两部分组成(见图 2)。

其中,  $G_1(s)$  代表炉内燃烧过程,输入是给煤量,输出是炉温相对变化;  $G_2(s)$  代表水冷壁的传热过程,输入是炉温相对变化,输出是水温变化;  $G_3(s)$  是锅炉入口水温对出口水温的传递函数;  $G_4(s)$  代表热网,输入是锅炉出口水温,输出是锅炉入口水温。控制器采用 Fuzzy-PI 双模控制器,通过调整给煤量控制锅炉出口水温。

$$G_1(s) = e^{-60s} \cdot \frac{0.74}{(1+270s)^3} \quad (2)$$

$$G_2(s) = \frac{T_{w20} - T_{w10}}{T_{w20}} \cdot \frac{1.31}{(1+20s)^2} \quad (3)$$

$$G_3(s) = \frac{T_{w10}}{T_{w20}} \cdot e^{-60s} \quad (4)$$

$$G_4(s) = \frac{T_{w20}}{T_{w10}} \cdot 0.6 \cdot e^{-1.320s} \quad (5)$$

式中:  $T_{w10}$  代表稳态锅炉入口水温,  $T_{w20}$  代表稳态锅炉出口水温。

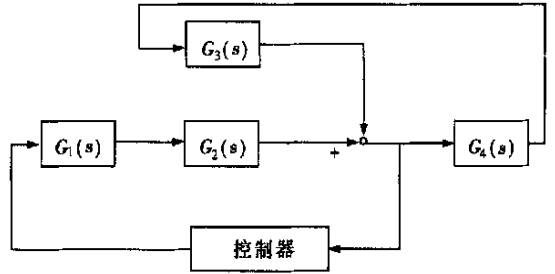


图 2 热水锅炉模型

分别采用延时 BP 网络、延时 RBF 网络和 Elman 网络构造锅炉出口水温的神经网络状态观测器,比较不同网络的状态观测器的性能。

训练数据曲线是控制器自控时,锅炉出口水温由 60℃升到 62℃的过渡过程曲线;检验数据曲线是控制器不自控时,给煤量由 42 升到 44.1 的过渡过程曲线。

#### 3.1 延时 BP 网络

采用延迟神经网络结构,采样间隔取 10 s,入口水温延迟 6 次,炉温延迟 2 次,出口水温反馈延迟 6 次,输入层单元数目为 17。

采用 delta-bar-delta 规则改进 BP 算法训练网络,其中  $\eta_0=0.75$ ,  $\alpha=0.75$ ,  $k=0.01$ ,  $\beta=0.2$ ,  $\xi=0.7$ 。

采用增加隐含层单元数目的方法确定隐含层单元数目。逐次增加隐含层单元的数目,并计算检验数据的误差,直到检验数据的误差不再下降为止。经实验,确定隐含层单元数为 89。

图 3(a)是 BP 网络的输出和检验数据的比较。

总误差  $E=126.72$ 。

#### 3.2 延时 RBF 网络

采用延迟神经网络结构,采样间隔取 10 s,入口水温延迟 6 次,炉温延迟 2 次,出口水温反馈延迟 6 次,输入层单元数目为 17。

采用 OLS 算法训练网络,其中  $\rho=0.01$ ,得到 273 个中心。

图 3(b)是 RBF 网络的输出和检验数据的比较。

总误差  $E=38.76$ 。

#### 3.3 Elman 网络

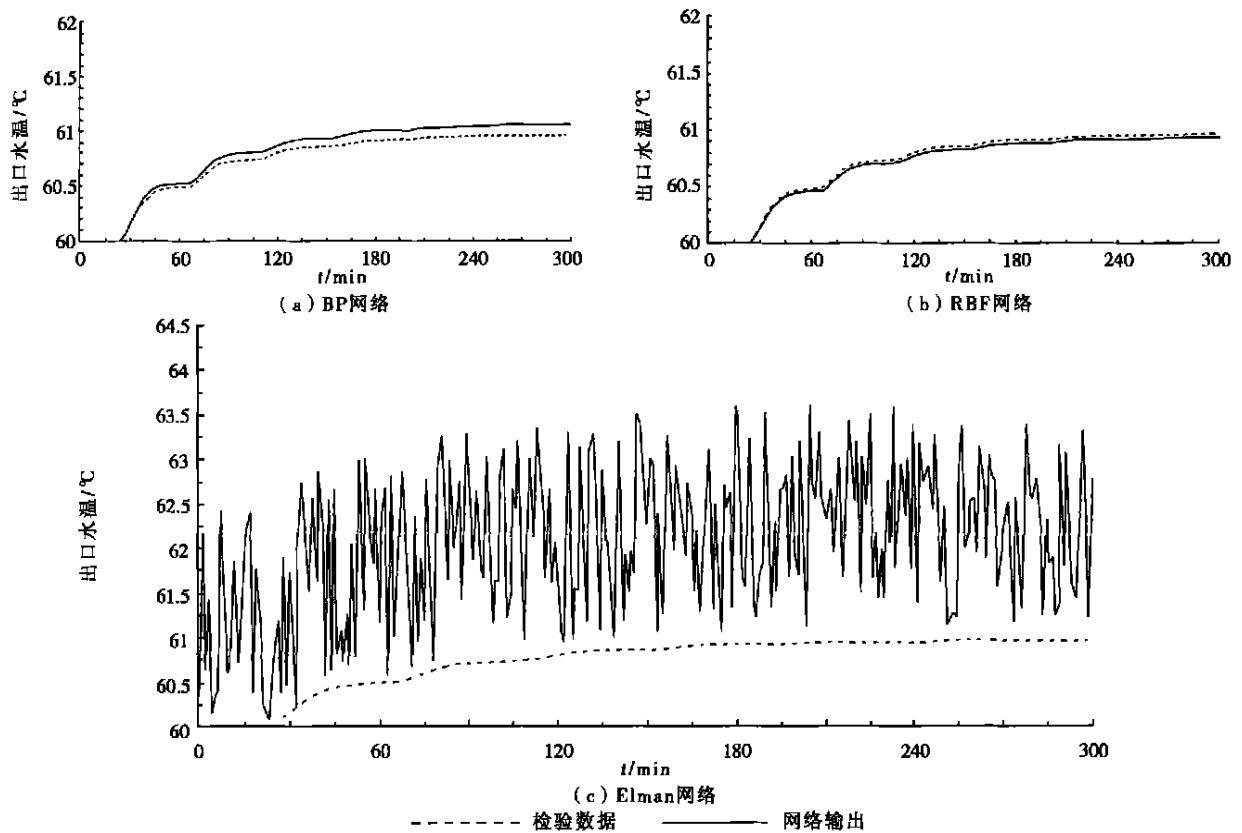


图 3 检验数据与网络输出

输入层的输入单元是入口水温、炉温和出口水温反馈。

采用动态 BP 算法, 其中  $\eta=0.1$ 。取隐含层单元数目为 45。

图 3(c) 是 Elman 网络的输出和检验数据的比较。总误差  $E=2434.81$ 。

#### 4 仿真结果分析

经过比较, Elman 网络输出数据曲线呈现振荡趋势。理论上讲, Elman 网络动态递归的特性造成结构单元连接权的稳定性较差, 对于高阶系统, 学习步长必须取得极小, 导致逼近精度很差, 训练的难度要大于延时神经网络, 所以 Elman 网络推广能力最差; 延时 BP 网络和延时 RBF 网络都有比较好的推广性, 但 RBF 网络的学习可以采用聚类(或类似的其它方法)确定函数中心, 隐含层到输出层的连接权可直接计算, 避免了学习中的反复迭代过程, 所以学习速度较快, 而且 RBF 网络所需训练样本多些; 而 BP 网络所采用的 BP 算法基于随机逼近原理, 收敛速度慢, 但所需样本量可能少于 RBF 网络。一般认为 RBF 网络的推广能力要优于 BP 网络。

#### 5 工程应用

基于动态神经网络的传感器故障诊断的方法已经在青岛煤气公司自控系统中应用, 该系统中采用延时 RBF 网络构造神经网络状态观测器。工程应用的结果证明该方法是行之有效的, 为传感器故障诊断提供了一条准确快速的新途径, 提高了热力系统运行的可靠性, 同时对于其它系统的故障诊断也具有一定的参考意义。

#### 参考文献:

- [1] WILLSKY A S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems[J]. *Automatica*, 1976, 12: 601-611.
- [2] 张星昌. 前馈神经网络的新学习算法研究及其应用[J]. *控制与决策*, 1997, 12(3): 213-216.
- [3] 周东华, 王庆林. 基于模型的控制系统的故障诊断技术的最新进展[J]. *自动化学报*, 1995, 21(2): 244-248.
- [4] 徐春晖, 徐向东. 前馈型神经网络的新学习算法研究[J]. *清华大学学报*, 1999, 39(3): 1-4.
- [5] 徐嗣鑫, 戴友元. 前向神经网络的一种快速学习算法及其应用[J]. *控制与决策*, 1993, 8(4): 284-288.

( 辉 编辑 )

fuzzy mathematics

热力系统传感器故障检测的动态神经网络方法 = **A Dynamic Neuron Network Method for Sensor Failure Detection in a Thermodynamic System** [刊, 汉] / MA Tao, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 237 ~ 239

A nonlinear time-dependent thermodynamic system status is analyzed with a fault-detection and diagnostic method being carried out by a dynamic neuron-network status observer. Through the simulation tests conducted on a hot-water boiler model by the use of a time-delay neuron network and dynamic recursive neuron network it is shown that the thermodynamic system sensor detection and diagnostic method based on the above-mentioned observer is feasible. After a comparison of the simulation test results one can see that the time-delay RBF (radial basis function) network has a relatively good potential for further widespread applications. The use of the above method in an automatic control system of Qingdao Gas Co. has confirmed its reliability. **Key words:** dynamic neuron network, failure detection

200 MW 机组运行性能诊断的热经济学方法 = **Thermoeconomic Method for the Performance Diagnosis of a 200MW Power Plant** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-dong, WANG Jia-xuan, WANG Qing-zhao, et al (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 240 ~ 244

On the basis of a thermoeconomics structure theory discussed is a thermoeconomic method for the operation performance diagnosis of a thermodynamic system. With the thermodynamic system calculation model of a 200MW power plant serving as an example the fuel/product relation of constituent elements is expounded and the thermoeconomics production model set up. After a theoretical analysis and practical calculation of the increase in system resource consumption caused by a failure proposed are indexes of relatively high sensibility for failure discrimination. A quantized index for reflecting the impact of failures is also given while analytical computations are performed with regard to some specific cases. **Key words:** thermoeconomics, failure diagnosis, structure theory

一种基于低品位热源的 LNG 冷能回收低温动力系统 = **A Cryogenic Power System for Recovering LNG (Liquefied Natural Gas) Cooling Energy Based on a Low-grade Heat Source** [刊, 汉] / WANG Qiang, LI Yan-zhong, CHEN Xi (Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 245 ~ 247

On the basis of analyzing physical cold exergy of LNG (liquefied natural gas) the authors have proposed a low-grade heat source-based cryogenic power system for recovering LNG cooling energy. An investigation was conducted of the relevant parameters having an impact on the system cycle efficiency. The results of the investigation show that under a relatively low heat-source temperature the thermal and exergy efficiency of the system may attain in excess of 30%. From an analysis of the cycle-influencing main parameters it is ascertained that the condensing temperature of secondary cooling medium exercises a very great influence on the cycle efficiency. With the increase in evaporation temperature and the decrease in condensation temperature there will be an enhancement of both the cycle thermal efficiency and exergy. **Key words:** low-temperature heat source, liquefied natural gas, cooling energy recovery, power system

一种基于联合动力装置的船舶电力推进原动机模块 = **A Combined Power Plant-based Prime-mover Module for Marine Electric Propulsion** [刊, 汉] / JIANG De-song, XIE Chun-ling, SUN Yu-feng (Power Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy