

基于拉盖尔模拟神经网络的过热汽温 直接自适应控制系统

叶 军

(绍兴文理学院机电系, 浙江省 绍兴市 312000)

Direct Adaptive Control System of Super-heated Steam Temperature Based on Laguerre Analog Neural Network

YE Jun

(Department of Mechatronic Engineering, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: A kind of Laguerre analog compound orthogonal neural network was presented and was applied to the direct adaptive control of super-heated steam temperature in a power plant. Herein, the analog neural network was developed to employ the direct adaptive controller. This single-hidden layer orthogonal neural network is based on Laguerre compound orthogonal polynomial function and has a simple learning algorithm that is derived from an on-line continuously learning, and the learning algorithm is not relative to the controlled plant model. Owing to using the three-layer network structure and no weight adjustment between the input and the hidden layer, the learning algorithm is used to search for optimum weights between only the hidden layer and the output layer. Therefore, the orthogonal neural network has fast learning speed. A node(a processing element) in the hidden layer of the network is an expansion term of the Laguerre polynomials. More or less terms determine the network learning speed and accuracy. Simulation for the super-heated steam temperature in a power plant was carried out under such a control that had a severe uncertainty of parameters and disturbance, as well as a large time-delay. The results show that the control system performance is superior to the conventional PI control system.

KEY WORDS: analog compound orthogonal neural network; laguerre compound orthogonal polynomials; continuously learning algorithm; direct adaptive control; super-heated steam temperature

摘要: 提出一种 Laguerre(拉盖尔)模拟复合正交神经网络并应用于电厂过热汽温的直接自适应控制。模拟神经网络被

作为直接自适应控制器,这种单隐层正交神经网络是基于 Laguerre 复合正交多项式函数,并具有在线连续学习的简单算法,且学习算法与被控对象模型无关。由于采用3层网络结构,输入层与隐层之间不用权值调整,在学习算法中只要在输出层与隐层之间寻找最佳权值,因此网络学习速度较快。网络隐层节点(处理元)是 Laguerre 多项式展开项,展开项的多少决定着网络的学习速度和精度。通过对具有严重参数不确定性、扰动以及大延迟的电厂过热汽温被控对象进行仿真研究,结果表明控制系统性能优于常规的 PI 控制系统。

关键词: 模拟复合正交神经网络; 拉盖尔复合正交多项式; 连续学习算法; 直接自适应控制; 过热汽温

0 引言

PID 控制算法简单、鲁棒性强、可靠性高,目前仍然是实际工业过程控制中使用最广泛的控制规律。由于大多数工业过程往往表现出非线性、时变、迟延等特性,尤其对于不确定系统,常规的 PID 控制器往往难以取得良好的控制品质。

电厂锅炉主蒸汽温度对象具有大延迟、大惯性和时变性。许多学者开始寻求一些先进的控制方法,如模糊控制方法^[1]、参数自整定 PID 控制方法^[2-4]、神经网络方法^[5-6]等。神经网络具有较强的逼近非线性函数的能力,并具有自适应学习、并行分布处理和较强的鲁棒性及容错性等特点,为解决未知不确定非线性系统的建模和控制提供了一种新的有效途径。但由于常用的多层前馈神经网络计算量大、收敛速度慢,且容易陷入局部最小点,因而影响了它们的应用。目前,神经网络在控制系统中大都采用数字方式,即通过计算机用软件编程的

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(M603070)。

方法来实现。文献[7-9]已提出了一种模拟复合正交神经网络，并已获得应用，它具有算法简单、实时控制好，用模拟神经网络对其进行自适应控制，可以利用神经网络的自学习能力取得较好的控制效果。近几年发达国家开始注重对神经元芯片的研究，并获得了多项专利，说明神经网络的硬件化、模拟化是今后的一个重要研究方向^[10-11]。模拟电路实现的神经元控制器将具有模拟电路系统的许多优点，如较低的硬件成本，较强的抗干扰能力和调试容易等，同时它可以实现神经元权值的连续自动调节，能在线进行快速学习，因此，研究模拟神经网络具有十分重要的理论和现实意义。

对正交型神经网络现有文献已作了许多研究^[7-9,12-15]，但对 Laguerre 正交型神经网络则相对较少。神经网络控制器的研究趋向是网络应具有快速学习算法，以增强实时控制能力。为此，本文在 Laguerre 数字复合正交神经网络^[16]基础上提出 1 种具有单隐层的 3 层模拟复合正交神经网络并应用于电厂锅炉过热汽温的控制系统中。这里，模拟复合正交神经网络被作为直接自适应控制器，3 层正交神经网络是基于 Laguerre 复合正交多项式函数，具有在线连续学习的简单算法，且学习算法与被控对象模型无关。由于采用 3 层网络结构和输入层与隐层之间不用权值调整，在学习算法中只要输出层与隐层之间寻找最佳权值，因此网络学习速度较快。网络隐层节点(处理元)是 Laguerre 多项式展开项，展开项的多少决定着网络的学习速度和精度。将本方法应用于具有动态模型参数改变以及受外界干扰的电厂过热汽温的直接自适应控制系统的仿真研究结果表明，Laguerre 模拟神经网络能在线快速连续自学习，不仅可确保控制系统的稳定性和鲁棒性，而且可有效地提高系统的控制性能。

1 基于模拟神经网络的直接自适应控制方法

1.1 控制系统的实现

基于模拟神经网络的过热汽温直接自适应控制系统如图 1 所示。

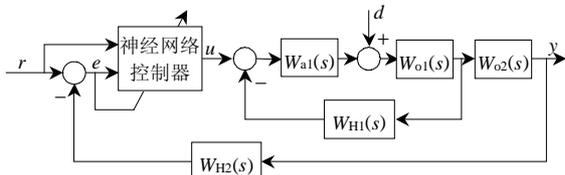


图 1 基于模拟神经网络的过热汽温直接自适应控制系统
Fig.1 Direct adaptive control system based on analog neural network

图中， r 为过热汽温设定值，mA； d 为系统的干扰，主要为减温水量的自发扰动； y 为系统的过热汽温输出； e 为系统误差； u 为神经网络控制器的输出；神经网络控制器和 $W_{a1}(s)$ 分别为汽温控制系统的主、副调节器； $W_{o1}(s)$ 、 $W_{o2}(s)$ 分别为调节对象导前区和惰性区的传递函数， $^{\circ}\text{C}/\text{mA}$ 、 $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ ； $W_{H1}(s)$ 、 $W_{H2}(s)$ 分别为导前汽温和过热汽温的测量单元， $^{\circ}\text{C}/\text{mA}$ 。各环节的传递函数^[6]分别为

$$\begin{cases} W_{a1}(s)=25 \\ W_{H1}(s)=W_{H2}(s)=0.1 \\ W_{o1}(s)=\frac{8}{(1+15s)^2} \\ W_{o2}(s)=\frac{1.125}{(1+25s)^3} \end{cases} \quad (1)$$

模拟神经网络是基于 Laguerre 复合正交多项式，神经网络控制器的输入为 $[r(t), e(t)]^T$ ，输出为 u 。显然，神经网络直接自适应控制在结构上与逆向建模思想有很多相似之处，由于网络具有在线连续学习的能力，即必将能保证逆模型的连接权值能够在在线修正，因此，这种直接自适应控制器具有鲁棒性。

1.2 Laguerre 模拟神经网络控制器算法

对于模拟复合正交神经网络控制器可从数字复合正交神经网络的模拟化获得。考虑多输入单输出三层前向神经网络，网络结构如图 2 所示。

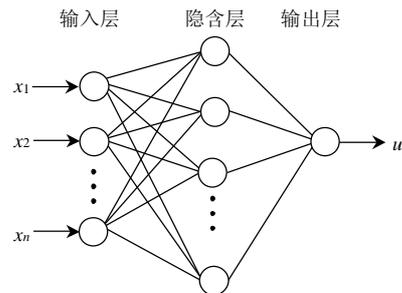


图 2 神经网络结构

Fig.2 Structure of Neural network

对于数字复合正交神经网络的输出为

$$u(k)=\sum_{i=1}^m w_i(k)p_i(k) \quad (2)$$

式中隐层第 p_i 个神经元(或称节点)的函数为 Laguerre 正交多项式，其 Laguerre 复合正交多项式^[16]为 $p_1=1, p_2=1-X, p_i=\{[p_2+2(i-2)]p_{i-1}-(i-2)p_{i-2}\}/(i-1), i=3, 4, \dots, m, m$ 为隐层神经元个数。取 X 为单极性 S 函数

$$X = \frac{1}{1+e^{-s-n}}$$

单极性 S 函数可以把输入从区间 $[-\infty, +\infty]$ 变换

成[0,1]区间输出，并可通过修改参数 s 来改变 S 函数的倾斜度，以提高网络的学习适应性；而 $n = \sum_{i=1}^m x_i$ ， x_i 为网络的输入信号。复合正交神经网络的输入层至隐层联接权值恒为 1，隐层第 i 个神经元到输出层神经元之间的连接权值为 w_i ($i = 1, 2, \dots, m$)， m 为隐层神经元个数。

把被控对象作为网络的一部分，则复合正交神经网络性能指标为

$$J(k) = \frac{1}{2} e(k)^2 \quad (3)$$

其中 e 为系统误差。权值调整可表示为

$$\Delta w(k) = h e(k) P(k) \quad (4)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) \quad (5)$$

式中： $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ ， $P = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$ ； h 为网络学习速率， $h \in (0, 1)$ 。

为了获得一种模拟神经网络，将式(4)变形为

$$w_i(k) - w_i(k-1) = h e(k) p_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

将式(6)两边同除以采样周期 T ，并将 h/T 记为 h' ，当 $T \rightarrow 0$ 时可得

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = h' e(t) p_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

将式(7)两边积分得

$$w_i(t) = w_i(0) + \int_0^t h' e(t) p_i(t) dt \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

将式(8)与式(2)相结合便可得到模拟神经网络的输出表达式

$$u(t) = \sum_{i=1}^m w_i(t) p_i(t) \quad (9)$$

2 仿真实验

为了验证本文所提出的控制方法对被控对象动态特性变化的适应性，对所提神经网络控制方法与单独 PI 控制方法进行仿真比较研究。

对于仿真用的网络结构，一般网络输入层节点数由输入变量数确定，输出节点数由网络输出变量数确定；一般来说，网络隐层节点数越多，网络逼近函数的精度就越高，系统的控制精度也可提高，但网络的学习速度和控制的响应速度就会变慢。通常隐层节点数可按经验选取或根据系统控制精度要求由仿真实验选取。本文取神经网络结构为 $N_{2 \times 5 \times 1}$ ，神经网络控制器的输入为 $x = [x_1, x_2]^T = [r(t), e(t)]^T$ ，输出为 $u(t)$ ；网络参数取 $s = 0.5$ ， $h' = 0.0045$ 。

模拟神经网络主控制器的输出为

$$u(t) = \sum_{i=1}^5 w_i(t) p_i(t)$$

相应的权值调整可表示为

$$w_i(t) = w_i(0) + \int_0^t h' e(t) p_i(t) dt \quad i = 1, 2, \dots, 5$$

按文献[6]，取 PI 主控制器为

$$u = 2(1 + \frac{1}{74s})$$

根据式(1)系统对象作仿真实验。图 3 为设定值 r 作阶跃变化时，基于模拟神经网络的直接自适应控制系统与常规串级 PI 控制系统响应曲线的比较。可以看出，采用模拟神经网络直接自适应控制比常规 PI 控制的动态响应的超调量和平稳性有了较大的改善，提高了控制系统的性能。

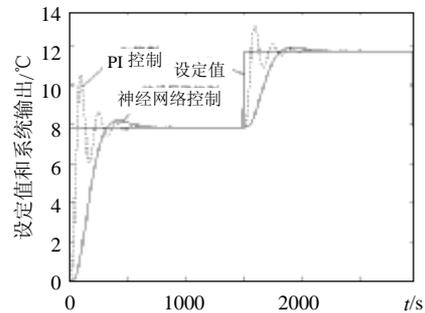


图 3 设定值跟踪响应曲线
Fig.3 Set-point tracking response curve

假定过热汽温对象的惯性时间常数和增益发生变化时，变化后的对象模型分别为 ($W_{o1}(s)$ 保持不变)：惯性时间常数增大 $W_{o2}(s) = 1.125 / (1 + 35s)^3$ ，增益变大 $W_{o2}(s) = 1.875 / (1 + 25s)^3$ 。图 4、图 5 分别为对象惯性时间常数变化和增益变化后控制系统的设定值响应曲线。从图中可以看出，当对象的惯性时间常数发生变化时，常规 PI 串级控制系统的性能明显下降，而本文所提出的控制方法仍具有较好的控制效果；当对象的增益增大时，常规 PI 串级控制系

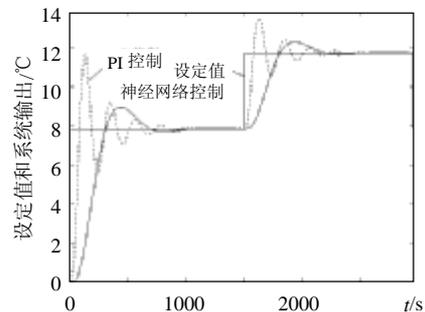


图 4 对象惯性时间常数变化后设定值跟踪响应曲线
Fig.4 Set-point tracking response curve for inertia variation of plant

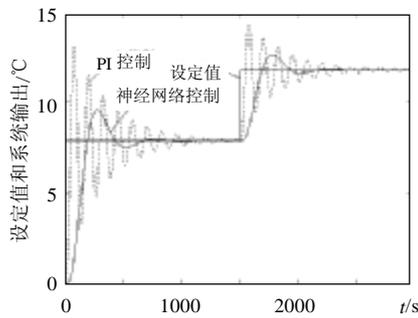


图5 对象增益变化后设定值跟踪响应曲线

Fig. 5 Set-point tracking response curve for gain variation of plant

统的控制品质已出现恶化,而本文所提出的控制方法仍能保持较好的控制效果,具有较好的鲁棒性。

图6为系统的扰动响应曲线,在800s时扰动作+1mA的阶跃变化。从系统响应曲线可以看出,本文所提控制方法的抗扰性能比常规PI控制要差些,这主要是控制系统受到阶跃干扰时,神经网络要有一个学习过程才能适应系统的变化,因此神经网络的学习速度直接影响到系统的控制性能,对于复合正交神经网络学习速度的提高以及控制方法的改进有待进一步研究。

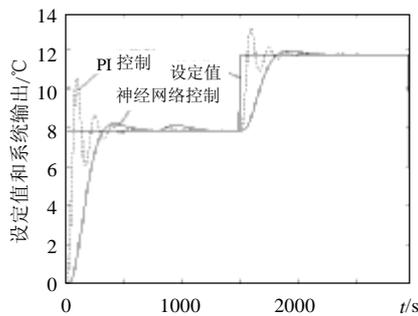


图6 扰动响应曲线

Fig. 6 Disturbance response curve

3 结论

本文提出了一种Laguerre模拟复合正交神经网络并应用于电厂过热汽温的直接自适应控制系统中,由于模拟神经网络控制器是基于在线连续学习算法,且学习算法与被控对象模型无关,因此,使控制系统能够适应对象的动态变化,从过热汽温的直接自适应控制系统的仿真结果来看,系统具有较好的控制性能,但控制系统的快速响应能力还不是很好,因此,该神经网络的学习速度和控制性能的提高有待进一步研究。由于该神经网络控制器可望用模拟电路或神经芯片实现硬件化,又可适合于不确定被控对象的控制,因此具有很好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23-28.
Fan Yongsheng, Xu Zhigao, Chen Laijiu. Study of adaptive fuzzy control of boiler superheated steam temperature based on dynamic mechanism analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(1): 23-28(in Chinese).
- [2] 刘志远, 吕剑虹, 陈来九. 智能PID控制器在电厂热工过程控制中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 128-134.
Liu Zhiyuan, Lü Jianhong, Chen Laijiu. Prospects of application of intelligent PID controller in power plant thermal process control [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 128-134(in Chinese).
- [3] 李萌, 沈炯. 基于自适应遗传算法的过热汽温PID参数优化控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 145-149.
Li Meng, Shen Jiong. Simulation study of adaptive GA-based PID parameter optimization for the control of superheated steam temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 145-149(in Chinese).
- [4] 王东风, 韩璞. 基于免疫遗传算法优化的汽温系统变参数PID控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 212-217.
Wang Dongfeng, Han Pu. Variable arguments PID control for main steam temperature system based on immune genetic optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 212-217(in Chinese).
- [5] 何玉彬, 王晓予, 闫桂荣. 神经网络在线学习模糊自适应控制及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 67-70.
He Yubin, Wang Xiaoyu, Yan Guirong. Neural network online learning fuzzy adaptive control and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 67-70(in Chinese).
- [6] 刘志远, 吕剑虹, 陈来九. 基于神经网络在线学习的过热汽温自适应控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 179-183.
Liu Zhiyuan, Lü Jianhong, Chen Laijiu. Superheated steam temperature adaptive control system based on neural network online learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 179-183(in Chinese).
- [7] 叶军. 伺服系统在摩擦条件下的模拟复合正交神经网络控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 127-130.
Ye Jun. An analog compound orthogonal neural network control of the servo system in friction condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 127-130(in Chinese).
- [8] 叶军. 基于模拟正交神经网络的电热干燥器温度控制[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 105-108.
Ye Jun. Temperature control of electric heating dryers based on an analog orthogonal neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 105-108(in Chinese).
- [9] Ye J. Analog compound orthogonal neural network control of the robotic manipulator[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics and Information, Chongqing, 2005.
- [10] Valle M. Analog VLST implementation of artificial neural networks with supervised on-chip learning[J]. Analog Integrated Circuits and Single Processing, 2002, 33(3): 263-287.
- [11] Lu C, Shi B X, Chen L. An on-chip BP learning neural network with ideal neuron characteristics and learning rate adaptation[J]. Analog Integrated Circuits and Single Processing, 2002, 33(1): 55-62.

- [12] 叶军, 张新华. 多层前向神经网络的快速学习算法及其应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(Suppl.): 817-819.
Ye Jun, Zhang Xinhua. High speed learning algorithm for a multilayer feedforward neural network and its application[J]. Control and Decision, 2002, 17(Suppl.): 817-819(in Chinese).
- [13] 叶军. 基于复合正交神经网络的自适应逆控制系统[J]. 计算机仿真, 2004, 21(2): 92-94.
Ye Jun. Adaptive inverse control system based on compound orthogonal neural network[J]. Computer Simulation, 2004, 21(2): 92-94(in Chinese).
- [14] Yang S S, Tseng C S. An orthogonal neural network for function approximation[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1996, 26(B5): 779-785.
- [15] Hsu J H, Tseng C S. Application of three-dimensional orthogonal neural network to craniomaxillary reconstruction[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2001, 25(6): 477-482.
- [16] 叶军. 一种 Laguerre 复合正交柔性神经网络模型[C]. 2004 中国控制与决策学术年会论文集, 中国, 黄山, 2004.
Ye Jun. A kind of Laguerre compound orthogonal flexible neural network model[C]. Proceedings of 2004 Chinese Control and Decision Conference, Huangshan, China, 2004(in Chinese).

收稿日期: 2006-06-29。

作者简介:

叶 军(1959—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事智能控制和过程控制研究等, yejnn@yahoo.com.cn。

(责任编辑 云爱霞)