

火电厂锅炉主汽温控制策略的比较研究

孙成龙, 赵景波, 胡春霞

(青岛理工大学 自动化工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 锅炉的主汽温被控对象是一个大惯性、大迟延、非线性且对象变化的系统, 常用的汽温控制系统有串级 PID 控制和基于 BP 神经网络的 PID 控制。串级 PID 控制一般能将主汽温控制在允许的范围内; 基于 BP 神经网络的 PID 控制将神经网络所具有的自学习能力与 PID 控制器的鲁棒性相结合, 能实现对非线性、大时滞系统模型的控制。对这两种策略在不同负荷下进行了实验仿真, 该结果对当前电厂的经济性和安全性有一定参考价值。

关键词: BP 神经网络; PID 控制; 主汽温

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2014)24-0076-03

Thermal power plant boiler main steam temperature control strategy comparative study

Sun Chenglong, Zhao Jingbo, Hu Chunxia

(College of Automation Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: Boiler main steam temperature controlled object is a large inertia, large time delay, nonlinear and the changeable object system. Cascade PID control and PID control based on BP neural network are commonly used in the steam temperature control system. Cascade PID control can control main steam temperature in the allowed range, PID control based on BP neural network, which combines the ability of self-study of the neural network with the robustness of the PID controller can realize the control to the nonlinear, large delay system model. This article analyses the two strategies in different loading conditions, the results have a certain reference value for the current power plant in economy and safety.

Key words: BP neural network; PID control; main steam temperature

锅炉的主蒸汽温度与火电厂的经济性和安全性有重要的关系, 是火电厂的一个极其重要的参数, 其控制的好坏直接影响到电厂的整个经济效益。主蒸汽温度的控制任务是: (1) 维持主蒸汽温度在允许的范围之内。对于亚临界机组的主蒸汽温度为 $540\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 长期运行应控制在 $540\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 对于超临界及超临界主蒸汽温度控制在 $(540\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 610\text{ }^{\circ}\text{C}) \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 长期运行应控制在 $(540\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 610\text{ }^{\circ}\text{C}) \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) 保护过热器, 使其管壁不超过允许的工作温度。气温过高, 会烧毁过热器的高温段, 气温每降 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 热经济性下降 1% , 气温偏低会使蒸汽机尾部蒸汽湿度增大甚至带水, 严重影响汽机的安全运行。

影响主汽温的扰动因素很多, 主要有蒸汽量扰动、烟气量扰动和减温水量扰动。而对主汽温的控制策略通常有两种:

(1) 在火电厂实际生产过程中, 针对主汽温控制是一个存在大时滞、时变性、大干扰、具有不确定性和非线性的复杂热工对象, 常规气温控制系统设计为串级 PID 控制, 如图 1 所示。

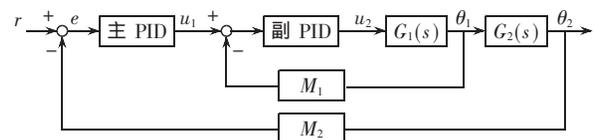


图 1 主汽温串级控制框图

其中, r 为主汽温设定值, $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 分别为控制系统对象的导前区和惰性区的传递函数, M_1 、 M_2 分别为副变送器 and 主变送器传递函数。

(2) 利用神经网络的非线性特性和不依赖于对象精

技术与方法 Technique and Method

确模型的优点,对主汽温的控制方案加入 BP 神经网络,搭建成基于 BP 神经网络的 PID 控制系统,用以完成对锅炉主汽温的控制。该方案如图 2 所示。

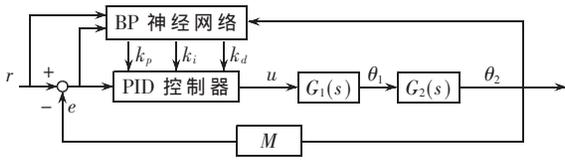


图 2 主汽温基于 BP 神经网络的 PID 控制框图

在传统 PID 的基础上增加了一个 BP 神经网络,用神经网络在线实时输出 PID 的比例、积分和微分三个参数。

1 BP 神经网络的算法

上文中 BP 神经网络采用三层结构: j 表示输入层节点, i 表示隐含层节点, l 表示输出层节点。输入层有 m 个输入节点,隐含层有 q 个隐含节点,输出层有 3 个输出节点。输入节点对应所选的系统运行状态量,输出节点分别对应 PID 控制器的三个参数 k_p 、 k_i 、 k_d ,输出层神经元激活函数取非负的 Sigmoid 函数。BP 神经网络的输入层输出为:

$$O_j^1 = x(j) \quad j=1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

隐层输入:

$$net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=0}^m w_{ij}^{(2)} O_j^1 \quad (2)$$

隐层输出:

$$O_i^{(2)}(k) = g(net_i^{(2)}(k)) \quad i=1, 2, \dots, q \quad (3)$$

式中, $w_{ij}^{(2)}$ 为输入层到隐含层加权系数,上标 (1)、(2)、(3) 分别代表输入层、隐含层、输出层, $f(x)$ 为正负对称的 Sigmoid 函数,即:

$$g(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4)$$

最后网络输出层三个节点的输入为:

$$net_l^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^q w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (5)$$

最后的输出层的三个输出为:

$$O_l^{(3)}(k) = f(net_l^{(3)}(k)) \quad l=1, 2, 3 \quad (6)$$

即:

$$\begin{cases} O_1^{(3)}(k) = k_p \\ O_2^{(3)}(k) = k_i \\ O_3^{(3)}(k) = k_d \end{cases} \quad (7)$$

式中, $w_{li}^{(3)}$ 为从隐层到输出层加权系数,输出层神经元活化函数为:

$$f(x) = \frac{1}{2} (1 + \tanh(x)) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \quad (8)$$

取性能指标函数:

$$E(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 \quad (9)$$

用梯度下降法修正网络的权系数,并附加使搜索快速收敛全局极小的惯性项,则有:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (10)$$

其中, η 为学习率, α 为惯性系数。BP 神经网络输出层权的计算公式为:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial O_i^{(2)}(k)} f'(net_l^{(3)}(k)) O_i^{(2)}(k) + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (11)$$

同理可得隐层权的计算公式:

$$\Delta w_{ij}^{(2)}(k) = \eta g'(net_j^{(2)}(k)) \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} \Delta w_{lj}^{(3)}(k) O_j^{(1)}(k) + \alpha \Delta w_{ij}^{(2)}(k-1) \quad i=1, 2, 3, \dots, q \quad (12)$$

2 控制系统的仿真研究

采用如图 1 和图 2 所示的控制策略,主蒸汽温度的导前区数学模型为 $G_1(s)$,惰性区数学模型为 $G_2(s)$ 。仿真时采用 600 MW 直流锅炉主汽温对象的动态特性,如表 1 所示。

表 1 600 MW 直流锅炉主汽温的对象动态特性

负荷/%	导前区 $G_1(s)$	惰性区 $G_2(s)$
37	$5.07/(1+28s)^2$	$0.481/(1+56.65s)^8$
50	$3.067/(1+25s)^2$	$1.119/(1+42.1s)^7$
75	$1.657/(1+20s)^2$	$1.202/(1+27.1s)^7$
100	$0.815/(1+18s)^2$	$1.276/(1+18.4s)^6$

其中,串联控制的副控制器采用 P 控制, $k_{p2}=1$;主控制器采用 PI 控制, $k_{p1}=0.05$, $k_i=0.05$ 。基于 BP 神经网络的 PID 控制方案中,采用 PID 控制,BP 神经网络取三层神经网络,有 3 个输入,分别为输入信号、输出信号、输入与输出之差,阈值取为 1;有 3 个输出 k_p 、 k_i 和 k_d ,隐含层取 5 个节点。学习步长 $\eta=0.6$,惯性系数 $\alpha=0.06$ 。对于惰性区传递函数采用近似方法用 e^{-10s} 来代替。

限于篇幅仿真结果只列出负荷为 50% 和 100% 时两种控制策略的仿真曲线和 100% 负荷时 BP 神经 PID 控制下的 3 个参数变化曲线。图 3、图 4 所示分别为负荷为 50%、100% 时阶跃响应曲线。

图中虚线代表串联控制下的阶跃响应曲线,实线代表 BP 神经 PID 控制下的阶跃响应曲线。

负荷为 100% 时 BP 神经 PID 控制下的 3 个参数变化曲线如图 5 所示。仿真结果分析如表 2 所示。

从以上仿真结果分析,基于 BP 神经网络的自整定 PID 控制能依据被控对象的变化自适应地调整 PID 的 3 个参数,依据一定的最优准则满足不同负荷下的控制要求。在不同负荷下,也即从锅炉的启动到稳定运行的整

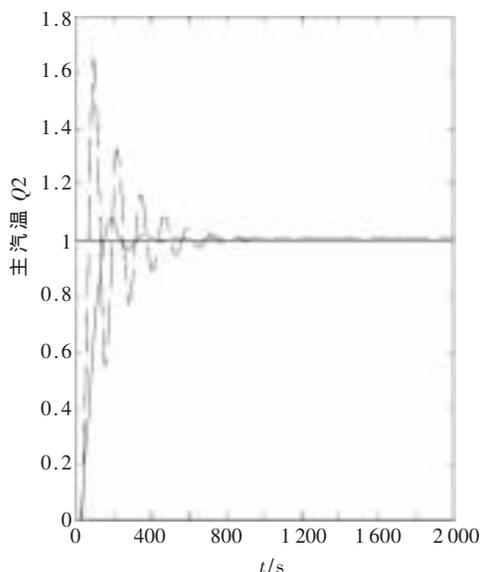


图3 负荷为50%时阶跃响应曲线

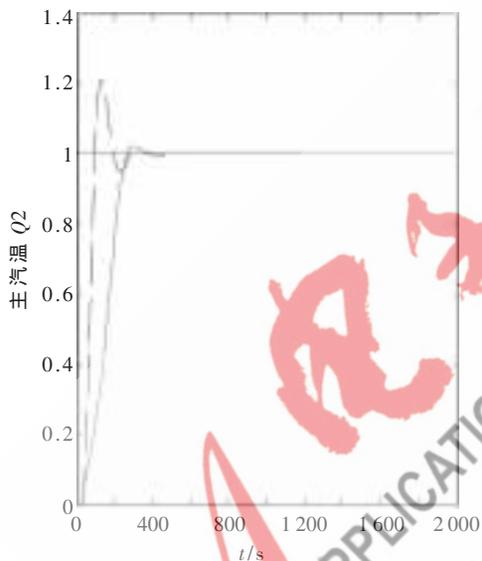


图4 负荷为100%时阶跃响应曲线

个过程,都可以实现较好的控制,且调节时间短,超调量小。当负荷为100%变化时,基于BP神经网络的PID控制与串级控制的调节时间相近,但是超调量却明显优于串级控制;当负荷比较低时,串级控制的效果极差,而基于BP神经网络的PID控制仍然有比较好的控制效果。

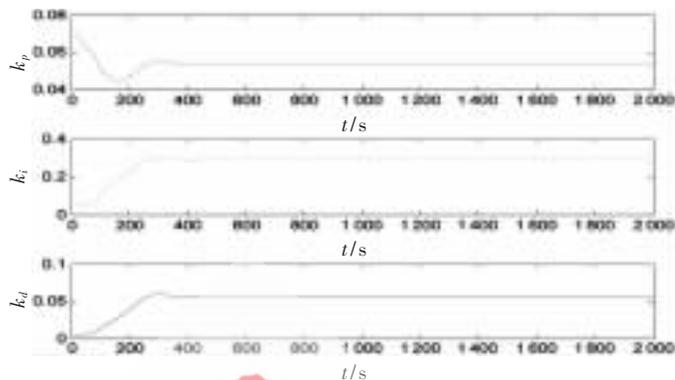


图5 负荷为100%时BP神经PID控制下的3个参数变化曲线

表2 各种负荷下的仿真结果

负荷/%	方案	调节时间/s	超调量/%
37	串级控制	1 800	75
	BP神经PID控制	800	16
50	串级控制	1 200	66
	BP神经PID控制	600	8
75	串级控制	650	43
	BP神经PID控制	480	4
100	串级控制	480	23
	BP神经PID控制	475	2

参考文献

- [1] 刘金琨.先进PID控制及其MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [2] 马平,朱燕飞,牛征.基于神经网络的主汽温控制系统[J].华北电力大学学报,2001,28(2):52-55.
- [3] 薛阳,叶建华,钱虹,等.火电机组过热汽温神经网络控制的研究[J].上海电力学院学报,2009,25(1):33-38.
- [4] 王华春.基于模糊神经网络的主汽温控制系统的研究[D].保定:华北电力大学,2003.
- [5] COMINOS P, MUNRO N. PID controlles: recent tuning methods and design to specification[C]. IEEE Proceedings control theory and application 2002, 149(1):46-53

(收稿日期:2011-09-27)

作者简介:

孙成龙,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向:控制理论与控制工程。

赵景波,男,1971年生,博士,主要研究方向:控制理论,单片机控制及数字信号处理。