

锅炉过热器系统的动态仿真模型

(哈尔滨工业大学 计算机信息中心, 黑龙江 哈尔滨 150001) 陈晓东 王子才*

摘要: 鉴于机理模型很难再现锅炉过热器系统的复杂动态特性, 本文利用机理模型为主导, 动态神经网络在线修正, 从而显著地提高了仿真模型的精度。仿真结果表明, 此建模方法为复杂大系统的动态仿真提供了一个理想的建模途径。

关键词: 锅炉; 过热器; 仿真; 建模方法

中图分类号: TK223.3⁺2; TP183 文献标识码: A

1 引言

随着工业技术的飞速发展, 锅炉过热系统变得日趋复杂, 这无疑给系统的仿真建模带来了诸多的难题。

虽说利用质量、能量和动量守恒等基本方程可以建立起实际系统的数学物理模型, 并近似地反映出系统工作的主要规律, 但是由于机理模型通常都是在一定的假设条件下得到的, 而且不可避免地引入状态方程中的小参数造成维数灾难或因局部机理不明确而使用经验或半经验公式造成的不确定系数^[1]。因而, 在系统动态特性变化较剧烈时, 机理模型与实际系统的输出也存在着较大的误差。

为了能有效地克服由于机理模型简化条件的局限性和简化方法本身带入的误差以及未知的外界和内部扰动带来的模型误差, 本文利用动态神经网络对机理模型进行在线修正。将神经网络作为模型误差的估计器叠加到机理模型上, 从而达到提高模型精度并有效地反映系统真实信息的目的^[2]。

2 锅炉过热器系统的机理模型

本文建模对象是一台 200 MW 自然循环锅炉。它的过热器系统包括顶棚包墙管, 前屏过热器, 后屏过热器, 一级对流过热器, 二级对流过热器以及一、二级喷水减温器。

除了减温器外, 以上各环节的焓温通道数学模型都可归属于单相介质焓温通道的数学模式^[3]。故在实际建模过程中, 可采用多段集总参数化模型, 且

每段以介质出口参数作为集总参数环节的代表参数。

各段环节数学模型如下:

工质能量平衡方程

$$\frac{dH_2}{d\tau} = \frac{(W_1 H_1 - W_2 H_2 + Q_2)}{M} \quad (1)$$

其中: W_1, W_2 分别为每段环节的进、出口质量流量。

H_1, H_2 分别为每段环节的进、出口工质焓。

Q_2 为金属放出的热量, M 为工质质量。

工质状态方程

$$T_2 = T_2(P_2, H_2) \quad (2)$$

其中: P_2, T_2 分别为每段环节的出口工质压力及温度。

金属蓄热方程

$$M_m C_m \frac{dT_m}{d\tau} = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

其中: M_m, C_m, T_m 分别为金属管壁质量, 金属比热, 温度。

Q_1 为金属吸收热量。

金属放热方程

$$Q_2 = k_2 W_1^{n_2} \left(T_m - \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (4)$$

其中: k_2, n_2 为金属向蒸汽工质的放热系统和放热指数, 通常 $n_2 = 0.8$ 。

金属吸热方程

$$Q_1 = k_1 W_g^{n_1} \left(\frac{T_{g1} + T_{g2}}{2} - T_m \right) + Q_R \quad (5)$$

其中: W_g, T_{g1}, T_{g2} 分别为烟气计算流量, 每段环节进、出口烟气温度。

k_1, n_1 分别为烟气向金属的放热系数和放热指数, 通常取 $n_1 = 0.65$ 。

补充说明:

(1) 金属质量是指每段受热面之金属质量, 它的温度对受热面内介质传热计算起直接作用。而位于炉顶部分的联箱、连接管等只考虑其金属的动态有效热容, 并合并为工质的当量质量。

(2) 前屏过热器为全辐射型过热器, 后屏过热器为半辐射型过热器, 对流过热器也接受少量的辐射热量。

3 神经网络与机理模型的混合建模法

神经网络和机理模型的混合建模方法的主要思想就是将建模者对被建模系统的先验性信息(即机理特性)融入神经网络的建模之中。本文采用并行建模方案, 如图 1 所示。

4 Elman 动态递归网络

4.1 网络结构

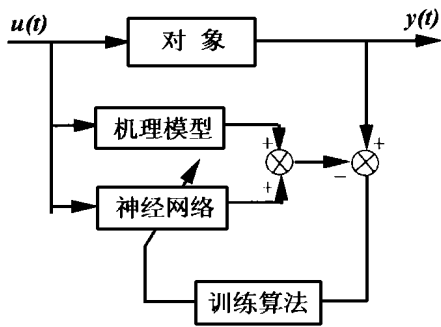


图 1 神经网络与机理模型的混合建模法

在动态递归网络中, Elman 网络^[4~5]具有最简单的结构, 它可用标准 BP 算法进行学习。其网络结构示意图如图 2。

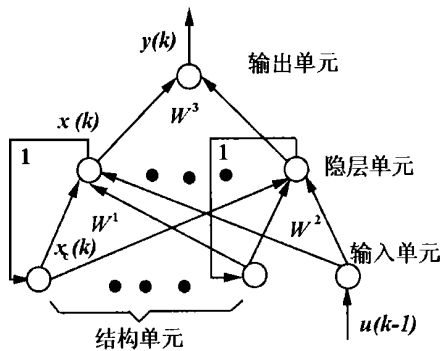


图 2 Elman 网络的结构示意图

从图 2 中可以看出, Elman 网络除输入层、隐层及输出层单元外, 还有一个独特的结构单元。与通常的多层前馈网络相同, 输入层单元仅起信号传输作用, 输出层单元起线性加权的作用, 隐层单元可有线性或非线性的激发函数。而结构单元则用来记忆隐层单元前一时刻的输出值, 可认为是一个一步时延算子。

具体地说, 网络在 k 时刻的输入不仅包括目前的输入值 $u(k-1)$, 而且还包括隐层单元前一时刻的输出值 $x_c(k)$, 即 $x(k-1)$ 。这时, 网络仅是一个前馈网络, 可由上述输入通过前向传播产生输出, 标准

的 BP 算法可用来进行连接权修正。在训练结束之后, k 时刻隐层的输出值将通过递归连接部分, 反传回结构单元, 并保留到下一个训练时刻 ($k+1$ 时刻)。在训练开始时, 隐层的输出值可取其最大范围的一半, 例如当隐层单元为 Sigmoid 函数时, 此初值可取为 0.5, 当隐层单元为双曲正切函数时, 则可取为 0。

4.2 学习算法

设网络的外部输入为 $u(k-1) \in R^r$, 输出为 $y(k) \in R^m$, 若记隐层的输出为 $x(k) \in R^n$, 则有如下非线性状态空间的表达式成立。

$$\begin{aligned}
 x(k) &= f(W^1 x_c(k) - W^2 u(k-1)) \\
 x_c(k) &= x(k-1) \\
 y(k) &= g(W^3 x(k))
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

其中: W^1, W^2, W^3 分别为结构单元到隐层、输入层到隐层、以及隐层到输出层的连接权矩阵, $f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 分别为输出单元和隐层单元之激发函数所组成的非线性向量函数。

5 仿真实验

为了更好地考核所建过热器系统仿真模型的动态特性, 我们做了一个变负荷的动态仿真试验。

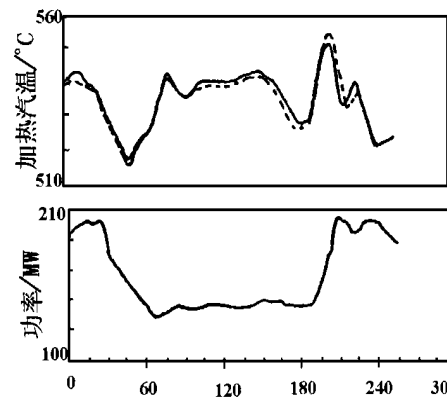


图 3 变负荷仿真实验曲线

变负荷定压运行分为四个阶段: 202 MW 降至 180 MW (平均速率 6.6%/min); 180 MW 降至 132 MW (平均速率 2.6%/min); 142 MW 升至 180 MW (平均速率 5.18%/min); 180 MW 升至 205 MW (平均速率 8.51%/min); 因汽机调节阀不易控制, 因此, 升、降负荷仿真实验中均是按滑压式运行。

本实验中采用了以下两种燃烧系统调节方式。
(1) 给煤量调节通过改变给煤机转速来实现。
(2) 给煤量与一次风量同时调节。

仿真结果见图 3。仿真结果与现场测试结果比
(下转 297 页)

表2 蓄热器计算结果

	蓄热量(蒸汽)/t	充热压力/MPa	放热压力/MPa	单位容积蓄热量/kg·m ⁻³	充水系数	容积/m ³
重机厂方案	12	1.5	0.4	86	0.9	155
本文计算方案I	9.0	1.5	0.4	86	0.9	116
本文计算方案II	9.9	1.5	0.4	86	0.9	128

表3 上海重型机器厂锅炉运行工况分段调节方案

方案I	分段区间	1:00~5:00	5:00~11:00	11:00~14:00	14:00~17:00	17:00~22:00	22:00~1:00
	锅炉房运行负荷工况/t·h ⁻¹		18.813	18.25	23.125	20.875	18.25
方案II*	分段区间	5:00~9:00	9:00~14:00	14:00~17:00	17:00~22:00	22:00~5:00	
	锅炉房运行负荷工况/t·h ⁻¹		17.406	21.85	20.875	18.25	17.607

*计算时锅炉负荷率取为0.7~1.1。

如果把本文介绍的计算机程序略作改动,此程序尚能用来在线控制锅炉房的负荷分配,从而随时获得优化的运行工况。事实上,如蓄冷和某些设备系统的生产调度等具有类似模型的系统的优化,在原则上也可以应用这个程序。

4 结论

(1)负荷的频繁波动及低负荷率是我国燃煤工业锅炉实际平均运行热效率长期远低于热平衡效率的主要原因之一。蓄热器是解决此难题的有效手段,然而其较大的投资是此项技术未能顺利推广的重要原因。

(2)借助于本文所述的蒸汽蓄热器容积最优化的计算机程序,能得到合乎技术要求的蓄热器最小容积,从而使蓄热器工程的初投资有望得到较大的降低。

(3)本文所述计算机程序原则上还可以应用于已有蒸汽蓄热器的锅炉房优化负荷分配的在线控制等其它场合。

参考文献

- [1] 张素刚. 引进国外先进技术,提高工业锅炉产品水平,工业锅炉,1998,(4):2~5.
- [2] 蒋耀祖,徐谦,沈秋月. 工业锅炉房燃烧优化控制的研究,动力工程,1987,(5):31~36.
- [3] Tanton D M, Cohen R R, Probert S D. Improving the effectiveness of a domestic central-heating boiler by the use of heat storage. Applied Energy, 1987, 27: 53~82.
- [4] 程祖虞. 蒸汽蓄热器的工程设计与应用,机械工业出版社,1985,77~78,12,15.
- [5] 盖永光,张超杰. 热电联产效益分析及系统构成分析,山东电力技术,1994,(2):20~23.
- [6] 瞿道和. 变压式蒸汽蓄热器在“蒸汽自供”系统中的应用及节能效果. 能源研究与信息,1997,(4):26~31.

(何静芳 编辑)

(上接277页)

较后,可以看出锅炉过热系统过热蒸汽温度的仿真结果与实测结果吻合很好。可见,本文利用集总参数法建立的系统机理模型为主导,并辅之以动态神经网络的在线修正,从而构成的全工况锅炉过热系统仿真模型无论在大扰动下的过渡过程,还是在非稳态工况中都表现出很强的鲁棒性,并能保持很好的工程精度。

参考文献

- [1] 王科俊,王克成. 神经网络建模、预报与控制. 哈尔滨工程大

学出版社,1996,40~58.

- [2] 陈晓东. 电站仿真器锅炉汽水系统建模方法的研究[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1998,76~84.
- [3] 王广军,章国华. 热力系统动力学及其应用. 北京:科学出版社,1997,70~81.
- [4] Elman J L. Find structure in time, Cognitive Science, 1990, 14(2): 179~211.
- [5] Pados A G. Application of the recurrent multilayer perceptron in modeling complex process dynamics. IEEE Trans. on Neural Networks, 1994, 5(2): 255~266.

(复 编)

words: steam turbine, power output uprating

应用于PRSTIG循环化SIA-02燃气轮机组上的喷射器= **An Ejector Used for the Model SIA-02 Gas Turbine Unit of a Partial Regeneration Steam Injected Gas Turbine (PRSTIG) Cycle** [刊, 汉] / Wen Xueyou, Lu Ben (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —269 ~ 271

A major constituent element of a partial regeneration steam injected gas turbine (PRSTIG) cycle system, the ejector was designed in adaptation for a model SIA-02 small-sized gas turbine. An analysis of the ejector design is also presented in the paper. **Key words:** partial regeneration steam injected gas turbine cycle, steam injected gas turbine cycle, ejector

油田射孔器材试验装置加热系统的数学模型与仿真分析= **Mathematical Modeling and Simulation Analysis of the Heating System of an Oil Field Perforation Equipment Test Rig** [刊, 汉] / Liu Cuiling, Wang Zicai, Sun Xingbo *et al* (Simulation Technology Research Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —272 ~ 275, 283

Based on the technical requirements of a perforation equipment test rig concerning its ability to bear high-temperature and high-pressure, the authors have designed a well-type dual-circulation electric heating furnace. A mathematical model of the heating-furnace heat transfer process has been set up. By way of simulation an analysis was conducted of the effect of the heating system process parameters on the temperature field profile along the flow path of the furnace. Such an analysis plays a significant role in providing guidance for high-precision control and prediction of the oil temperature in the heating system. The validity of the mathematical model has been verified by the actually measured results. **Key words:** heat transfer, mathematical model, heating furnace, temperature field, simulation

锅炉过热器系统的动态仿真模型= **Dynamic Simulation Model for a Boiler Superheater System** [刊, 汉] / Chen Xiaodong, Wang Zicai (Simulation Technology Research Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —276 ~ 277, 297

As a mechanism model can hardly reproduce the complicated dynamic characteristics of a boiler superheater system, the authors have come up with a new modeling method. The proposed method consists in taking the mechanism model as a main guide and supplementing it with an on-line correction through the use of a dynamic neural network. The results of simulation indicate that such a model building method can provide an ideal approach for the dynamic simulation of a huge complicated system. **Key words:** boiler, superheater, simulation, model building method

汽轮机本体分段式通用模块化建模与仿真= **Modeling and Simulation of a Steam Turbine Proper through the Use of a Sectionalized General-modularization** [刊, 汉] / Zhu Wei, Jiang Zikang, Cheng Fangzhen, *et al* (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —278 ~ 280, 293

Described in this paper is the modeling of a steam turbine proper with the help of a sectionalized general-modularization. Furthermore, with a model C50-90/13 steam turbine being selected as an example, simulation results are given of the steam turbine under various operating conditions and pertinent analyses were also performed. Currently, the above-cited model has been successfully employed for an actual simulation object. Featuring a relatively high precision and versatility in engineering applications, it is suited for simulating steam turbines under various operating conditions. **Key words:** steam turbine, simulation, general modularization, modeling

二次风喷射角度对切向燃烧炉膛出口烟气流量偏差的影响= **The Effect of a Secondary Air Injection Angle on the Deviation of Flue Gas Flow Rate at a Tangentially Fired Furnace Outlet** [刊, 汉] / Zhao Yuan, Dong Peng, Qin Yukun, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —281 ~ 283

In a tangentially fired large-sized boiler there generally occurs a common phenomenon of flue gas flow deviation on the