

基于支持向量机和BP神经网络的燃煤锅炉 NO_x 排放预测

李鹏辉¹, 刘冉², 余廷芳²

(1. 华电电力科学研究院 浙江 杭州 310030; 2. 南昌大学热能与动力工程研究所 江西 南昌 330031)

摘 要: 基于某 660 MW 燃煤锅炉运行时的热态实验数据, 应用 BP 神经网络方法和支持向量机回归的方法对该燃煤电站锅炉 NO_x 排放特性分别进行建模, 针对 BP 神经网络存在的问题, 采用动量法对其进行改进, 而对 SVM 预测模型进行了核函数及相应参数 c 和 g 进行了选优。两种模型仿真结果的平均相对误差为 2.75% 和 1.37%, 证明模型的准确性和泛化能力比较好。引入神经网络模型评价指标, 对这两种模型的仿真和预测结果进行对比分析, 结果表明采用支持向量机方法建立的 NO_x 排放模型比 BP 神经网络模型收敛速度快, 准确度高, 性能更优。

关键词: 锅炉; NO_x 排放; BP 神经网络; 支持向量机

中图分类号: TK223 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.10.018

引 言

随着经济的快速发展, 火电厂的燃煤消耗量逐年增加, 伴随而来的是氮氧化物的排放量也越来越多, 由它而引发造成的酸雨和光化学烟雾等污染物对环境危害巨大^[1], 因此, 我国对控制氮氧化物的排放问题也是更加重视, 要求的排放指标愈发严格。燃煤电站为达到国标要求的氮氧化物排放限值, 对锅炉燃烧器进行低氮燃烧改造, 调整锅炉的配风、配粉方式及加装 SNCR(选择性非催化还原) 和 SCR(选择性催化还原) 脱硝装置等。由于 NO_x 形成的机理比较复杂, 控制和预测氮氧化物的排放量也是非常困难, 电厂在实际生产中, 往往采取实炉调试的办法摸索最佳工况, 工作量巨大, 影响电站锅炉经济运行并且所得到的效果不理想^[2]。伴随着计算机领域的迅速发展, 人工智能技术在预测锅炉氮氧化物排放方面取得了一些成果。

鲍春来等在基于 RBF 神经网络模型的电站锅炉燃烧优化中比较准确的预测了 NO_x 排放量^[3], 不仅提高了锅炉的燃烧效率, 同时降低了 NO_x 排放量; 安恩科等采用支持向量机方法建立了燃煤锅炉 NO_x 排放预测模型和锅炉效率预测模型^[4], 并通过遗传算法对 NO_x 排放和锅炉效率进行多目标优化; 周昊等应用人工神经网络的非线性动力学特性及自学习特性, 建立了锅炉 NO_x 排放特性的神经网络模型, 并对所建立的神经网络模型进行了实验验证^[5-6]; 陈庆文等应用 BP 神经网络对大型电站锅炉混煤掺烧燃烧工况下的 NO_x 排放特性进行预测^[7], 并对锅炉运行参数进行优化, 保证燃煤锅炉高效低污染运行; 赵欢等建立了基于核主元分析支持向量回归机与机理模型混合的锅炉 NO_x 排放特性响应模型^[8]。以往研究建模方法单一, 缺少对比, 模型的结构比较复杂, 泛化能力不强等问题。

本文采用 BP 神经网络和支持向量机这两种建模方法, 对燃煤锅炉 NO_x 的排放特性进行建模研究, 并且引入神经网络模型评价指标对两种建模方法进行比较分析, 直观比较 BP 神经网络模型和支持向量机模型的优势和不足。综合以往研究成果, 过大的负荷变动对模型的建立有一定的影响, 机组过大的负荷变动率会导致神经网络模型精确度低, 实际燃煤锅炉也基本会有频繁的大范围的负荷变动, 否则也失去了研究意义, 因此本次旨在锅炉一定的负荷率和固定燃烧煤种的前提下进行研究。

1 研究的对象

某台 660 MW 超超临界参数燃煤变压直流锅

收稿日期: 2015-08-05; 修订日期: 2016-01-19

基金项目: 国家自然科学基金燃煤电站锅炉经济运行与污染排放多目标优化研究(61262048)

作者简介: 李鹏辉(1991-), 男, 陕西大荔人, 华电电力科学研究院助理工程师。

炉采用一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架及悬吊结构 II 型布置。制粉系统采用中速磨煤机直吹式正压冷一次风制粉系统,每炉配 6 台磨煤机,1 台磨煤机对应单面墙的一层燃烧器。燃烧方式采用前后墙对冲燃烧,前后墙各布置三层煤粉燃烧器,共 36 只低 NO_x 旋流煤粉燃烧器。同时在前、后墙各布置一层燃尽风口。

2 神经网络建模

人工神经网络是采用仿生学模仿人类大脑神经网络的结构和功能,由大量简单的神经元连接组合起来,建立其自己的信息处理系统,具有高度的非线性拟合能力。大型电站燃煤锅炉的运行系统非常复杂,其炉膛内的燃烧过程以及在这过程中生成的各种产物都是很难用准确的数学函数关系表达出来。这是一个典型的非线性映射关系,而人工神经网络恰恰能够很好的处理此类问题而不需要考虑氮氧化物复杂的生成机理,因此锅炉燃烧系统非常适合采用人工神经网络建模。神经网络性能的评价指标不仅要求神经网络对训练集有较好的拟合能力,同时要求对训练集以外的测试集有较好的预测结果,这跟神经网络的泛化能力有关^[9~11],泛化能力的强弱反映了神经网络模型的适用性。本文对研究对象锅炉的氮氧化物排放特性建立 BP 神经网络模型和支持向量机模型,通过神经网络性能评价指标对两种

模型的优缺点进行评判,探索不同模型在电站锅炉的适用能力。

2.1 BP 神经网络模型

由于燃煤锅炉的氮氧化物生成是一个十分复杂的过程,受到锅炉各方面参数的影响,主要包括锅炉炉型、燃烧方式、燃用煤种、风煤比、配风方式、炉膛温度以及其分布的均匀性等因素,同时这些因素之间存在着复杂的耦合关系,目前还没有准确的函数模型能够准确的表示^[12~13]。BP 神经网络的信号传递分为两个阶段,训练时从输入层到输出层正向传播,误差信号从输出层到输入层逆向传播,修改调整各层之间的权值和阈值,可以将输入参数和输出参数之间的映射关系简单拟合。由于该机组已经投产运行,锅炉的结构和燃烧方式都已经确定,热态试验阶段锅炉燃用煤种保持不变,锅炉给煤量、二次风量、燃尽风量以及这些因素之间的配比关系对 NO_x 的生成量影响比较大,其中燃煤量对 NO_x 的生成量的影响用 6 台磨煤机的给粉量来描述;氧量对 NO_x 的生成量的影响用各个二次风风门开度来描述;4 个燃尽风风门开度对 NO_x 的生成量也有影响,因此也作为输入参数。总共有 22 个输入参数,输出参数为 NO_x 的排放浓度。选取了机组经常运行的 500 ~ 660 MW 时的 70 组热态实验数据,将其中 62 组数据作为训练数据样本,建立 BP 神经网络模型,其余的 8 组数据作为测试数据,用来验证网络模型的拟合能力和泛化能力。具体热态试验数据如表 1 所示。

表 1 实验数据样本

Tab. 1 Experimental data samples

工况	给煤量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$						二次风风门开度比例/ $\%$												燃尽风/ $\%$				$\text{NO}_x / \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
	A	B	C	D	E	F	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	E ₁	E ₂	F ₁	F ₂	A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	
1	43.6	42.2	37.8	42.6	49.3	42.2	98.1	98.9	50.5	49.7	6.6	75.3	6.6	99.8	98.8	98.4	74.6	75.2	30.2	30.2	49.3	50.3	480.7
2	45.6	43.9	39.3	44.9	51.3	36.8	98.1	98.9	50.4	49.8	6.6	75.3	6.6	99.9	98.7	98.4	74.6	75.2	30.2	30.2	49.4	50.3	471.1
...
35	48.7	40.4	36.9	40.1	30.9	42.5	98.1	99.1	88.1	94.5	6.6	59.8	6.6	99.9	99.2	98.4	40.2	40.5	69.9	70.4	39.7	40.5	444.3
...
70	42.6	35.9	47.4	46.4	36.7	46.8	98.7	99.6	88.7	98.5	6.6	59.8	6.6	99.9	99.0	70.5	49.7	50.1	75.4	75.7	58.9	60.6	518.7

BP 神经网络的学习算法采用最速下降 BP 算法 SDBP(反向传播算法),是非线性回归模型参数最小二乘估计的一种迭代算法,可以加快迭代计算的速度,更快的得到收敛结果。在此基础上加入权值更新动量因子,使得权值更新具有一定的稳定性,

并且在防止震荡能力和收敛速度等性能方面有所提升。当训练均方误差小于 0.001 时结束训练。在训练网络模型前对数据样本进行归一化处理,消除各维数据间数量级差别,避免因为输入输出数据数量级差别较大而降低网络性能^[14]。调整网络的隐含

层节点个数,以确定最佳的隐含层节点,当隐含层节点个数为 18 时,所建立的 BP 神经网络模型达到最佳性能。神经网络的模型如图 1 所示,包含 Input(输入层)、Hidden(隐含层)、Output(输出层)。

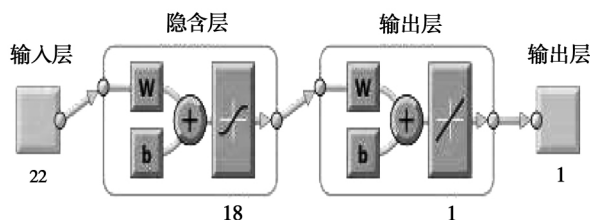


图 1 BP 神经网络模型

Fig. 1 BP neural network model

BP 神经网络仿真预测结果如图 2 所示,可以看出, BP 神经网络仿真值与训练值基本重合,少数不重合的点,也是在训练值的附近,基本都在合理范围内,没有大幅度失真的预测结果。测试样本的真实值和预测值也非常接近,证明网络模型的准确性较好。输入参数与输出参数之间的拟合程度高,也说明该网络模型对氮氧化物排放浓度的预测效果比较好。图 3 给出了 BP 神经网络模型的相对误差,训练值与仿真值的最大误差为 4.50%,最小误差 0.25%,整个网络的平均相对误差约 2.75%。该机组锅炉的省煤器出口的氮氧化物含量一般在 400 mg/m^3 ,因此该误差在可接受范围内。

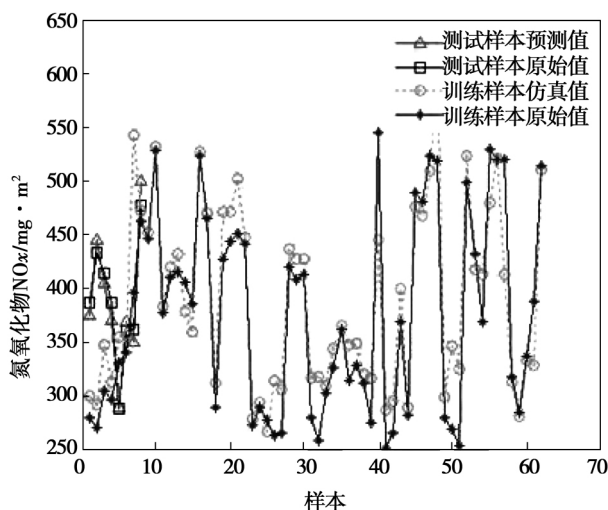


图 2 BP 神经网络模型

Fig. 2 BP neural network model

2.2 支持向量机模型

支持向量机的主要思想是建立一个最优决策平面,使正例和反例之间边缘最大化,它的理论基础是统计学理论,可用于模式分类和非线性回归。模型中使用了 libsvm 工具箱^[15],它是台湾大学林智仁教授开发的一个简单、易于使用且快速有效的 SVM 模式识别与回归的软件包,其提供了很多默认的参数,使参数调节相对较少,并提供了交互检验的功能。SVM 用于回归预测时,其参数选择大部分靠经验、实验对比、大范围搜索或利用软件包提供的交互检验功能进行寻优。本文采用交叉验证的方法选择惩罚参数 c 和核函数 g ,该方法就是让 c 和 g 在一定范围内取值,对于取定的 c 和 g 把训练样本集作为原始数据集利用 libsvm 工具箱的 $K-CV$ 方法得到在此组 c 和 g 下训练集结果的最低的均方差,选取该组作为最佳的参数,通过交叉验证的方法,得到的最佳 $c=0.625$ 和 $g=3.6$ 。为了避免出现网络模型在训练过程中难以收敛以及保证模型的准确性和泛化能力,对数据样本进行归一化处理。

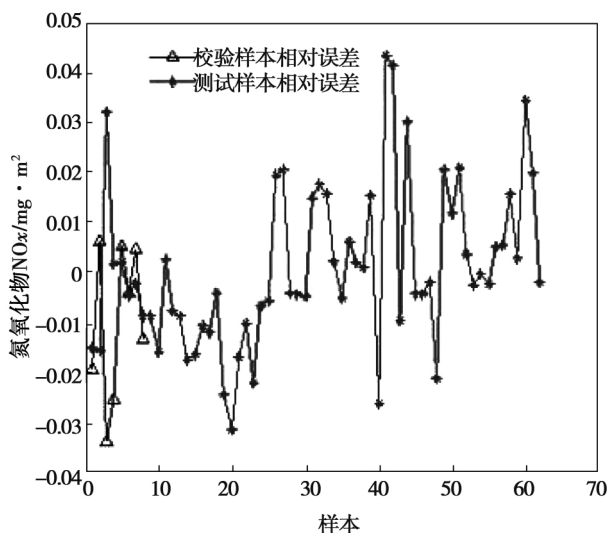


图 3 BP 网络预测误差

Fig. 3 Prediction error of the BP network

为了和 BP 神经网络模型预测和仿真的结果进行对比,因此支持向量机模型采用和上文建立 BP 神经网络模型相同的的数据样本,输入和输出数据,如表 1 所示。

支持向量机模型的仿真及预测的结果如图 4、图 5 所示,从中可以看出训练样本的仿真值和真实值比较吻合,大部分工况都能够很好的模拟,训练样

本的最大误差为 2.88% ,最小误差为 0.20% ,平均误差约为 1.37% ,支持向量机网络的各项误差都较小。测试样本的真实值和预测值也非常接近 ,说明该网络的仿真结果较好 ,预测能力和泛化能力较强 ,误差大小能够满足研究对象的实际要求。

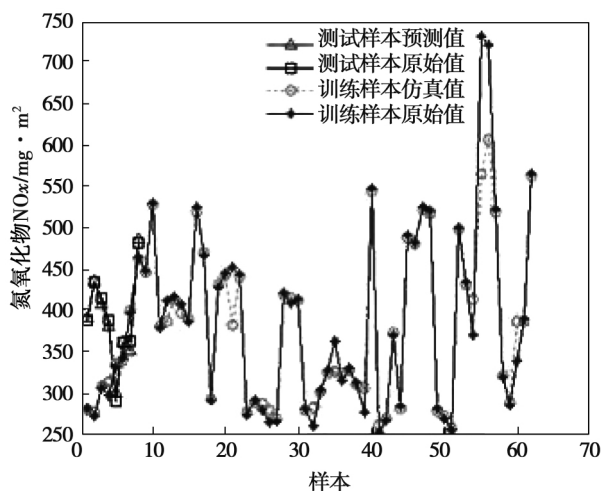


图 4 支持向量机模型预测结果

Fig. 4 Prediction results by SVM

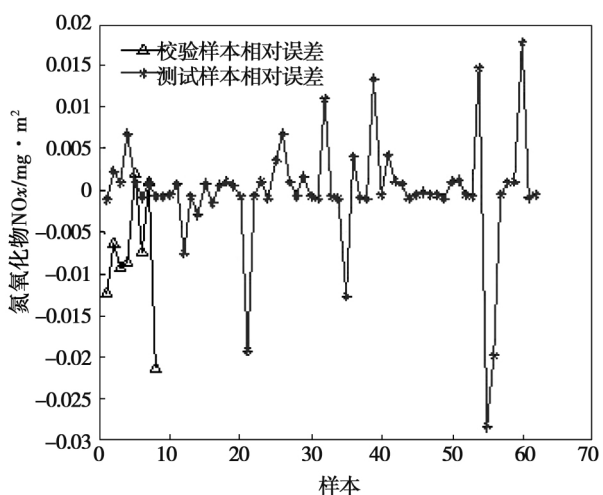


图 5 支持向量机模型预测相对误差

Fig. 5 Prediction relative error of SVM

2.3 两种模型的对比分析

BP 神经网络和支持向量机都可以用来处理非线性回归、非线性拟合问题 ,但它们基于的理论基础不同 ,回归的机理也不相同。支持向量机基于结构风险最小化理论 ,普遍认为其泛化能力要比 BP 神经网络的强。

便于更加准确的比较预测效果和两种模型的预

测能力 ,本文因而引入了以下 3 个评价指标:

(1) 平均绝对相对误差 ,最大绝对相对误差;

$$M = \frac{1}{N} \sum \frac{|V_p - V_r|}{V_r}$$

$$ME = \max \left| \frac{V_p - V_r}{V_r} \right|$$

(2) 训练样本的学习时间;

(3) 收敛速度。

式中: M —平均绝对相对误差; ME —最大绝对相对误差; V_p —训练样本仿真值; V_r —训练样本原始值。

表 2 评价指标值

Tab. 2 Evaluation index

评价指标	BP 神经网络模型	支持向量机模型
M	2.75	1.37
ME	4.50	2.88
训练时间	8.6	4.3
收敛速度	慢	快
最优性	局部	全局

根据表 2 中的支持向量机模型和 BP 神经网络模型的评价指标 ,得出支持向量机模型的仿真和预测精度高 ,计算速度快 ,泛化能力比 BP 网络较强 ,同时支持向量机神经网络模型可以克服计算过程陷入局部收敛 ,能够得到全局的最优解 ,网络的总体性能更佳。

4 结 论

(1) 燃煤锅炉的 NO_x 生成是一个十分复杂的过程 ,受到锅炉炉型、燃烧方式、燃用煤种、风煤比、配风方式、炉膛温度以及其分布的均匀性等因素影响 ,同时各个因素之间存在着复杂的耦合关系 ,还没有准确的函数模型可以表示 ,在一定的锅炉负荷和煤种范围内 ,采用 BP 神经网络模型和支持向量机模型可以将上述各个运行参数与 NO_x 排放浓度之间的复杂关系通过黑箱模型较为容易地表示出来 ,比传统的实炉调试摸索的方法节省大量的时间、工作量和经济成本;

(2) 采用 BP 神经网络模型和支持向量机建模方法对某超超临界 660 MW 机组锅炉建立了 NO_x 排放浓度预测模型 ,两种模型预测 NO_x 排放浓度结果的最大相对误差分别为 4.50% 和 2.88% ,平均相对

误差分别为 2.75% 和 1.37% ,说明两种模型都可以很好描述锅炉各个参数之间的关系 ,同时证明两种模型的合理性;

(3) 引入神经网络评价指标对两种模型比较分析 ,综合数据显示 ,支持向量机模型具有较强的仿真能力和泛化能力 ,每次计算得到的回归式唯一 ,而 BP 神经网络训练仿真的结果不稳定 ,同时支持向量机模型训练样本的学习时间短 ,收敛速度快 ,准确度高 ,整体的网络模型性能较 BP 神经网络好。

参考文献:

- [1] GB13223 - 2011 火电厂大气污染物排放标准[S].
GB13223 - 2011. Emission standard of air pollutants for thermal power plants [S].
- [2] 林新队. 基于神经网络的锅炉燃烧监督控制方法研究[J]. 机电工程技术 2006 35 (2) : 71 - 73.
LIN Xin-dui. Study on the control method of boiler combustion based on neural network [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology 2006 35 (2) : 71 - 73.
- [3] 鲍春来 张竟飞. 基于 RBF 神经网络模型的电站锅炉燃烧优化[J]. 发电设备 2013 27(2) : 97 - 100.
BAO Chun-lai ZHANG Jing-fei. Combustion optimization of power plant boiler based on RBF neural network model [J]. 发电设备 , 2013 27(2) : 97 - 100.
- [4] 安恩科 宋 尧. 基于支持向量机和遗传算法的燃煤锅炉多目标燃烧优化[J]. 节能 2008 10: 22 - 25.
AN En-ke SONG Yao. Optimization of multi objective combustion of coal fired boiler based on support vector machine and genetic algorithm [J]. Energy saving 2008 10: 22 - 25.
- [5] 周 昊 朱洪波. 大型四角切圆燃烧锅炉 NO_x 排放特性的神经网络模型[J]. 中国电机工程学报 2002 22(1) : 33 - 37.
ZHOU Hao ZHU Hong-bo. The neural network model of NO_x emission characteristics of the four corner tangentially fired boilers [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering 2002 22(1) : 33 - 37.
- [6] 周 昊 朱洪波 曾庭华 等. 基于遗传算法的燃煤锅炉热效率优化[J]. 中国电机工程学报 2002 22(7) : 126 - 128.
ZHOU Hao ZHU Hong-bo ZENG Ting-hua et al. By using the genetic algorithms to optimize the operation parameters of the utility boilers [J]. Proceedings of the CSEE. 2002 22(7) : 126 - 128.
- [7] 陈庆文 马晓茜 刘 翱. 大型电站锅炉混煤掺烧的 NO_x 排放特性预测与运行优化[J]. 中国电机工程学报 2009 29(23) : 20 - 25.
CHEN Qing-wen MA Xiao-qian LIU Ao. Prediction and operation optimization for NO_x emission property of large-scale mixed coal-fired utility boiler [J]. Proceedings of the CSEE. 2009 29(23) : 20 - 25.
- [8] 赵 欢 王培红. 电站锅炉热效率与 NO_x 排放响应特性建模方法[J]. 中国电机工程学报 2008 32(28) : 96 - 100.
ZHAO Huan WANG Pei-hong. Modeling method of thermal efficiency and NO_x emission response characteristics of power station boiler [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering 2008 32(28) : 96 - 100.
- [9] 陈 明. MATLAB 神经网络原理与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社 2013.
CHEN Ming. MATLAB neural network theory and example extract solution [M]. Beijing: Tsinghua University Press 2013.
- [10] 王春林 张 乐. 电站锅炉低 NO_x 燃烧建模优化研究与应用[J]. 热能动力工程 2013 28(4) : 390 - 394.
WANG Chun-lin ZHANG Le. Combustion modeling and optimization for low NO_x power plant boiler and its application [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2013 28(4) : 390 - 394.
- [11] 王小川 史 峰. Matlab 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 2011.
WANG Xiao-chuan SHI Feng. MATLAB neural network 30 case analysis [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press. 2010. 4.
- [12] 王新军 王 飞 马增益. 用于电站煤粉锅炉 NO_x 排放检测的 BP 神经网络试验研究[J]. 动力工程 2002 22(5) : 80 - 82.
WANG Xin-jun WANG Fei MA Zeng-yi. Experimental study of the BP neural network application in the NO_x emissions testing of pulverized coal fired boiler in power plant [J]. Journal of Power Engineering. 2002 22(5) : 1980 - 1982.
- [13] 王浙芬 罗自学 周怀春. 基于炉内温度分布的 NO_x 排放特性的神经网络模型[J]. 能源技术 2009 30(3) : 133 - 136.
WANG Xi-fen LUO Zi-xue ZHOU Huai-chun. Neural network model on NO_x emission with furnace temperature distribution in a boiler [J]. Energy Technology. 2009 30(3) : 133 - 136.
- [14] 周 品. MATLAB 神经网络设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社 2013.
ZHOU Pin. Design and application of MATLAB neural network [M]. Beijing: Tsinghua University press 2013.
- [15] LIN H T LIN C J. A study on sigmoid kernels for SVM and the training of non-PSD kernels by SMO-type methods [EB/OL] 2003.

(单丽华 编辑)

kJ/mol. When the conversion rate is 0.6 ,The activation energy would be as lowest as 68.93 kJ/mol. Within the range of 280 ~360 °C reaction ,the activation energy of pharmacy sludge pyrolysis reaction is 85.67 KJ/mol ,with the most probable mechanism function of $[-\ln(1-\alpha)]^3$. In 640 ~700 °C reaction range ,the activation energy of pharmacy sludge is 150.42 KJ/mol ,and the most probable mechanism function is $(1-\alpha^{-1})-1$. **Key words:** pharmacy sludge ,thermogravimetric analysis ,activation energy ,most probable mechanism function

高风速及风突变对风力机柔性部件振动特性研究 = **Vibration Characteristics of Flexible Components of Wind Turbine due to High Speed Wind and Wind Gust** [刊 ,汉] DING Qin-wei ,LI Chun (School of Energy and Power Engineering ,University of Shanghai for Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) , HAO Wen-xing ,YE Zhou (Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering , Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(10) . -96 ~103

Wind turbine suffers from complex environmental conditions and wind is the most important and direct factor that can affect the aerodynamic and structural characteristics. Abrupt wind speed change can lead to higher aerodynamic loads. In order to analyze the vibration characteristic of structure dynamics of wind turbine operating on a strong turbulent wind ,simulation was carried out based on NREL(National Renewable Energy Laboratory) 1.5 MW land-based wind turbine model. The structural dynamic model of wind turbine is flexible with the assumed mode discrimination that is established based on Kane method. Then this numerical model combines the wind field ,and aerodynamic model to form a dynamic model of an aero-elasticity coupling system ,in order to study the dynamic response of wind turbine blades and tower. The results show that adding coherent structure to turbulent flow results in higher wind speed change and stronger turbulent intensity compared to the basic turbulent wind. When the wind reaches ultimate speed ,wind rotors experience both in-plane and out-plane vibrations. With coherent structure added ,the vibration acceleration of rotors and tower increases several times. **Key words:** wind turbine ,coherent structure ,deflection ,vibration ,acceleration

基于支持向量机和 BP 神经网络的燃煤锅炉 NO_x 排放预测 = **Modeling of NO_x Emission from Coal Fired Boiler based on Intelligent Algorithm** [刊 ,汉] LI Peng-hui (Hua Dian Electric Power Research Institute ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310030) ,LIU Ran ,YU Ting-fang(Institute of thermal Energy and Power Engineering ,Nanchang University ,Nanchang ,China ,Post Code: 330031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(10) . -104 ~108

Based on the experimental data of the thermal state in the 500 MW ~600 MW load range of a coal fired boiler ,BP neural network and support vector machine regression were used to model the NO_x emission characteristics of a coal-fired power station. To address the problems of BP neural network ,the momentum method was adopted ,but for the prediction model of SVM ,the kernel function and the corresponding parameters c and g were selected through optimization. The average relative errors of the simulation results of the two models were 2.75% and 1.37% ,re-

spectively indicating a reasonable accuracy and generalization ability of the model. With the evaluation index of neural network model, the simulation and prediction results of the two models were compared and analyzed. The results show that the NO_x emission model established by the support vector machine method has faster convergence speed, higher accuracy and better performance than the one based on BP neural network model. **Key words:** boiler, NO_x emission, BP neural network, Support vector machine

基于系统仿真的火电机组一次调频性能优化 = Performance Optimization of Primary Frequency Regulation based on Modeling of Turbine and its Governing System [刊, 汉] SHENG Kai (State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007), JIANG Xiao-long (Shenhua Shengwan Hefei Lujiang Power Generation Co. Ltd, Hefei, China, Post Code: 231555), ZHOU Nian-guang, SONG Hai-hua (State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(10). -109~114

The performance of the primary frequency regulation in thermal power unit is of importance to the stability of power system and its economy. To optimize the performance, a model of steam turbine and its governing system were established based on system identification, and a key element of valve discharge characteristics was introduced into the model for its optimization. Through the improved model, performance factors of primary frequency regulation were quantitatively analyzed. According to analysis result, the valve discharge characteristic function was corrected, and the main steam pressure compensation was also brought into consideration, then control parameters of primary frequency regulation were re-tuned by considering robustness. Consequently, as indicated by the actual primary frequency regulation test, the performance of primary frequency regulation was satisfactory under multi-load conditions.

Key words: steam turbine and its governing system, modeling, primary frequency regulation, valve discharge characteristics, main steam pressure, parameter tuning

锅炉二次风挡板特性试验数据处理方法与应用 = Data Processing of Air Damper Performance Characteristics in Boiler Cold Test and Its Application [刊, 汉] LIU Fu-guo, LIU Ke, CUI Fu-xing, HOU Fan-jun (Shandong Electric Power Research Institute, Jinan, China, Post Code: 250003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(10). -115~121

A model for calculating the flow resistance from the secondary air chamber to furnace exit in boiler was established, then data processing procedure of air damper characteristics test was put forward accordingly: assuming the local resistance coefficient under 100% baffle opening is known as constant, furnace resistance coefficient is calculated from this fully opening damper test, then resistance coefficients under other openings are obtained according to the furnace resistance coefficient. These coefficients can be used to calculate velocity in secondary air nozzles when boiler is put into operation. This makes it possible of monitoring of air and fuel distribution along furnace height, which has remarkable significance for optimizing boiler combustion and reducing steam temperature fluctuations. **Key words:** boiler, secondary air, damper resistance characteristics, velocity in secondary air nozzles