

燃煤锅炉低氮氧化物燃烧特性的神经网络预报

周昊, 茅建波, 池作和, 蒋啸, 王正华, 岑可法(浙江大学热能工程研究所, 能源清洁利用和环境工程教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 大型燃煤电站锅炉的低 NO_x 燃烧技术日益受到关注, 但 NO_x 的排放特性复杂, 受煤种、锅炉设计结构和操作参数等多种因素影响. 在对某台 600 MW 四角切圆燃煤电站锅炉的 NO_x 排放特性和飞灰含碳量特性进行多工况热态测试的基础上, 应用人工神经网络的非线性动力学特性及自学习特性, 建立了大型四角切圆燃烧锅炉 NO_x 排放特性和燃烧经济性的神经网络模型, 并对此模型进行了校验. 结果表明, 该模型能根据燃煤特性及各种操作参数准确预报锅炉在不同工况下的 NO_x 排放和飞灰含碳量特性, 可为大型电站锅炉通过燃烧调整降低 NO_x 排放和提高锅炉燃烧效率提供有效手段.

关键词: 锅炉; NO_x ; 飞灰含碳量; 人工神经网络

中图分类号: X701.7 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)02-05-0018

Predicting Low NO_x Combustion Property of a Coal-Fired Boiler

Zhou Hao, Mao Jianbo, Chi Zuohe, Jiang Xiao, Wang Zhenhua, Cen kefa (Clean Energy and Environment Engineering Key Lab of MOE, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: More attention was paid to the low NO_x combustion property of the high capacity tangential firing boiler, but the NO_x emission and unburned carbon content in fly ash of coal burned boiler were complicated, they were affected by many factors, such as coal character, boiler's load, air distribution, boiler style, burner style, furnace temperature, excess air ratio, pulverized coal fineness and the uniformity of the air and coal distribution, etc. In this paper, the NO_x emission property and unburned carbon content in fly ash of a 600 MW utility tangentially firing coal burned boiler was experimentally investigated, and taking advantage of the nonlinear dynamics characteristics and self-learning characteristics of artificial neural network, an artificial neural network model on low NO_x combustion property of the high capacity boiler was developed and verified. The results illustrated that such a model can predicate the NO_x emission concentration and unburned carbon content under various operating conditions, if combined with the optimization algorithm, the operator can find the best operation condition of the low NO_x combustion.

Keywords: utility boiler; NO_x emission; unburned carbon content; artificial neural network

燃煤锅炉 NO_x 排放特性和锅炉飞灰含碳量特性很复杂, 受到如煤种、锅炉负荷、配风方式、炉型、燃烧器型式、炉温、过剩空气系数、煤粉细度、风粉分配均匀性等多种因素的影响, 很难采用简单的公式进行估算, 往往需采用实炉测试方法加以确定, 并由试验结果摸索降低 NO_x 及飞灰含碳量的方法, 但现场实炉测试工作量较大, 测试工况往往有限, 各参数对锅炉的燃烧特性都存在影响, 且互相叠加, 导致数据分析困难. 由于无法根据测试结果获得估算公式和具体的计算模型, 不能将试验结果进一步推广. 而锅炉燃用煤种和操作参数千变万化, 不可能

保证在试验工况下运行, 从而无法根据试验工况预测拟操作工况下的 NO_x 排放特性, 不利于大型燃煤锅炉通过燃烧调整降低 NO_x 排放和提高锅炉的燃烧经济性.

本文在对某台 600 MW 四角切圆燃煤电站锅炉的 NO_x 排放特性和飞灰含碳量特性进行多工况实炉热态测试的基础上, 应用人工神经网络的非线性动力学特性及自学习特性, 建立了大型四角切圆燃烧锅炉低 NO_x 燃烧特性的

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999022204)

作者简介: 周昊 (1973 ~), 男, 硕士, 讲师.

收稿日期: 2001-04-20; 修订日期: 2001-06-09

神经网络模型,并对此模型进行了校验.结果表明,该模型能根据燃煤特性及各种操作参数准确预报锅炉在不同工况下的 NO_x 排放特性和飞灰含碳量特性,如结合全局寻优技术,可为大型电站锅炉通过燃烧调整降低 NO_x 排放和提高锅炉燃烧效率提供有效手段.

1 人工神经网络和 BP 学习算法

人工神经网络是由大量模拟生物神经元的人工神经元广泛互连而成的网络,由大量的简单处理单元连接而成的自适应非线性系统.通过输入信号在各神经元之间的传递,获得输出,具有高度的非线性,并且系统可以从大量存在的知识样本中,通过学习提取出有效的知识和规则,对自身不断完善、发展和创新.

目前应用最广泛的 BP 网络是一种单向传播的多层前向网络,可看成是一个从输入到输出的高度非线性映射,即对于样本集合,通过 BP 网络可近似复杂的非线性函数关系而获得输出.人工神经网络近似复杂函数,处理信息的能力完全取决于网络中各种神经元之间的耦合权值,由于较大规模网络,各权值不可能被一一确定,因此网络本身需要学习能力,即能够从示范模式的学习中逐步调整各权值.现已证明用一个 3 层的 BP 网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映射^[1].图 1 示出了一个 3 层 BP 网络结构,图中 $[x]$ 表示输入参数, $[y]$ 表示输出参数,而 W_{ij} 表示输入层与隐含层之间的权值, W_{jk} 表示隐含层与输出层之间的权值.

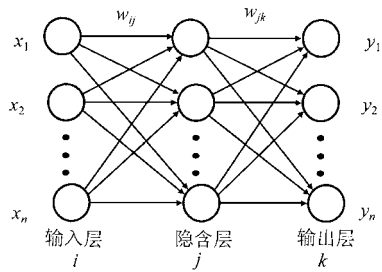


图 1 3 层 BP 网络结构
Fig.1 The schematic diagram of three layer back propagation network

BP 算法即误差反向传播算法是神经网络学习中最常用的学习方法之一, BP 算法通过对

神经计算得到的输出和样本值进行误差分析,不断反复修正神经网络中各权值,从而使网络的输出接近所希望的输出,最终误差满足要求,即确定学习结束,获得学习成功后的权值.由于在 BP 算法中误差计算是由输出层向输入层的方向进行,因此称为误差反向传播算法.有关人工神经网络和 BP 算法的具体论述可参见文献^[2].

2 试验设备

某 600 MW 四角切圆粉煤燃烧锅炉为亚临界控制循环固态排渣锅炉,炉膛尺寸 $19558\text{ mm} \times 16432.5\text{ mm}$.炉膛四角布置切向摆动式燃烧器,燃烧器可在上、下方向 $\pm 20^\circ$ 范围内摆动,以调节再热气温,采用同心反切燃烧系统.满负荷条件下投用 A—E 层一次风, F 层一次风备用.锅炉炉膛结构和燃烧器结构如图 2 所示.

3 600 MW 四角切圆粉煤燃烧锅炉 NO_x 排放特性热态测试结果

针对该 600 MW 锅炉常用的 2 种煤质进行了热态多工况 NO_x 排放特性的实炉测试,试验采用单因素轮回试验方法,对锅炉负荷、燃尽风 (OFA) 配风方式、二次风配风方式、煤种、燃烧器摆角等影响 NO_x 排放特性的多个因素进行了变工况试验,共安排了 12 个试验工况,如表 1、表 2 所示.其中工况 1 为燃用燃料 1 的标准工况,工况 2 ~ 5 试验了燃尽风 (OFA) 效果,工况 6 和 7 则对二次风配风方式影响进行了试验,工况 8、9 试验了燃烧器摆动影响,工况 10、11 则试验了负荷影响,而工况 12 为燃用燃料 2 的标准工况.试验过程中保持煤粉细度不变,试验测量了排烟氧量、 NO_x 浓度.锅炉各工况的 NO_x 排放情况和飞灰含碳量分别见表 3,可见顶部燃尽风配风方式对该炉的 NO_x 排放具有很大的影响,而二次风的配比方式、煤种、锅炉负荷、燃烧器摆动等都对 NO_x 排放浓度产生影响.由于该炉燃用着火和燃尽性能均较好的烟煤,各工况飞灰含碳量普遍较低.

4 利用人工神经网络对 600 MW 锅炉低 NO_x 燃烧特性进行建模

由锅炉的实炉热态测试数据可知,影响该

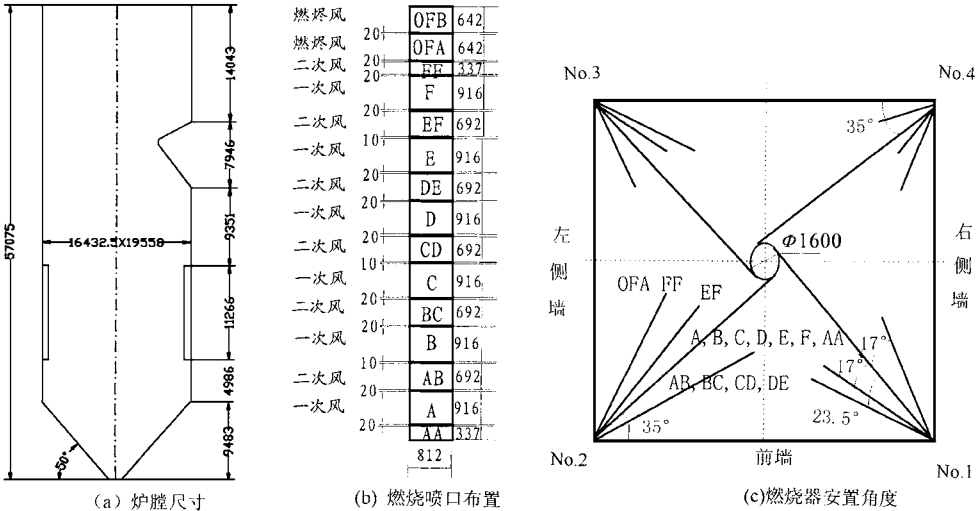


图 2 锅炉炉膛尺寸及燃烧器布置 / mm

Fig.2 The dimension of furnace and the arrangement of the burners

表 1 现场热态试验工况表 (I)

Table 1 The boiler operating condition

工况	总燃料量		总空气量		给煤机开度 / %					二次风门开度 / %					燃尽风开度	
	/ t · h ⁻¹		/ t · h ⁻¹		A	B	C	D	E	AA	AB	BC	CD	DE	EF	OFA
1	238.6		2367		67.77	68.8	70.6	66.17	67.97	65	65	65	65	65	65	60
2	237.1		2350		68.93	68.83	69.93	66.07	66.17	65	65	65	65	65	65	60
3	231.7		2328		64.37	69.23	68.93	67.8	61.34	65	65	65	65	65	65	60
4	232.7		2293		64.73	69.63	69.0	68.1	61.37	65	65	65	65	65	65	31.2
5	228.7		2283		63.13	68.17	68.23	67.23	60.7	65	65	65	65	65	65	0
6	240.4		2337		67.27	72.97	72.8	67.1	60.27	65	40	40	80	80	85	60
7	242.6		2343		70.3	73.77	73.1	67.5	61.1	65	65	65	65	65	85	60
8	241		2344		68.0	72.77	72.77	67.2	60.37	65	65	65	65	65	65	60
9	240.6		2367		70.97	73.37	73.07	67.3	59.57	65	65	65	65	65	65	60
10	180.7		1875		65.5	66.57	66.6	60.5	0	45	45	45	45	25	45	60
11	143		1520		49.77	52.73	53.3	47.27	0	45	45	45	45	45	45	48
12	239.2		2321		69.07	73.57	73.27	67.6	60.43	65	65	65	65	65	65	60

表 2 现场热态试验工况表 (II)

Table 2 The boiler operating condition (continued)

工况	OFB / %	氧量 / %	煤种特性							磨煤机通风量/t·h ⁻¹					风箱与炉膛差压 / kPa	燃烧器 摆动 ¹⁾
			C _{ar} / %	H _{ar} / %	O _{ar} / %	N _{ar} / %	Q _{ar^{net},p} / kJ·kg ⁻¹	V _{ar} / %	A	B	C	D	E			
1	40	3.3075	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	111.4	105.8	106.6	110.2	102.2	0.899	0.5	
2	100	3.325	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	111.6	106.1	104.0	109.2	103.2	0.844	0.5	
3	0	3.0225	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	109.0	107.3	105.1	105.4	103.9	0.962	0.5	
4	0	3.0417	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	98.54	106.4	99.65	105.8	106.1	1.016	0.5	
5	0	2.7617	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	109.7	108.1	104.6	107.6	105.2	1.014	0.5	
6	40	3.10	57.89	3.17	9.94	0.96	23677	24.75	104.3	118.9	117.5	106.7	106.0	0.931	0.5	
7	40	3.079	57.89	3.17	9.94	0.96	23677	24.75	104.1	110.4	114.0	106.7	105.5	0.888	0.5	
8	40	3.091	57.89	3.17	9.94	0.96	23677	24.75	102.5	110.8	115.9	107.7	105.6	0.882	0.6	
9	40	3.2317	57.89	3.17	9.94	0.96	23677	24.75	101.9	112.2	117.9	107.6	104.2	0.919	0.4	
10	0	3.9217	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	108.8	112.4	103.5	114.6	20.45	0.836	0.5	
11	0	4.7325	64.51	3.99	6.53	1.56	26069	28.11	112.4	110.4	101.4	118.1	17.30	0.480	0.5	
12	40	3.089	57.89	3.17	9.94	0.96	23677	24.75	102.8	110.2	116.5	106.7	105.8	0.892	0.5	

1) 燃烧器水平摆动对应值为 50 %,工况 8 上摆至 60 %,工况 9 下摆至 40 %.

表 3 各工况下 NO_x 排放量和飞灰含碳量¹⁾

Table 3 The NO _x emission concentration and unburned carbon content in fly ash												
工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
省煤器后氧量/ %	3.3075	3.325	3.0225	3.0417	2.7617	3.10	3.079	3.091	3.2317	3.9217	4.7325	3.089
NO _x / mg·Nm ⁻³	746.34	732.94	777.87	906.53	784.64	644.75	620.17	713.91	671.72	638.76	632.94	659.32
飞灰含碳量/ %	1.09	1.65	1.40	1.43	1.33	1.39	1.29	1.21	1.18	1.13	0.73	1.16

1) NO_x 浓度均折算到 6 % 氧量,下同

600 MW 锅炉燃烧特性的主要因素为锅炉负荷、燃煤特性、二次风配风模式、燃尽风配风模式、燃烧氧量、一次风煤粉沿炉膛高度的分布特性等。结合该炉集散控制系统(DCS)的采样数据列表,确定采用入炉总煤量和入炉总空气量各 1 个值以代表锅炉负荷的影响;二次风共投用 6 层,同层开度联动,因此采用 6 个二次风门开度值表示二次风的配风模式的影响;燃尽风投用 2 层,同层联动,有 2 个燃尽风开度值;二次风箱与炉膛之间的差压也影响二次风和燃尽风出口速度,共有 4 个差压测点,取其平均值作为 1 个输入参数;省煤器后共设置 4 个氧量测点,取其平均值以代表燃烧氧量影响;投用 5 台磨煤机和 5 台给煤机,取 5 个磨煤机通风量和 5 个给煤机开度以代表煤粉和一次风沿炉膛高度分布特性对 NO_x 排放的影响;煤种特性取收到基碳含量(C_{ar})、氢含量(H_{ar})、氧含量(O_{ar})、氮含量(N_{ar})、低位发热量(Q_{net,p}^{ar})和挥发分(V_{ar})等 6 个值。所有燃烧器均以相同摆角在炉内高度方向摆动以调节再热气温,对应 1 个燃烧器摆角。

因此,选用 29 个输入节点,1 个输出节点,31 个隐节点的 BP 网络结构。取表 1 和表 2 中工况 1~11 对应的 11 组样本数据用来训练神经网络。利用反向传播学习算法对网络进行训练,学习参数取为 0.9,采用动量附加法和自适

应的学习步长,当系统的均方误差小于 0.00001 时训练结束,共需 11918 次循环,输出此时调整后的权值和阈值,使人工神经网络通过学习获得正确的输入-输出响应行为,建立了锅炉运行参数和锅炉 NO_x 排放特性关系的神经网络数学模型。

为了验证模型的正确性,利用训练好的神经网络模型,采用调整后的权值和阈值对工况 12 的锅炉 NO_x 排放特性进行了评价检验,模型的输出为 681.19 mg·Nm⁻³,而试验实测为 659.32 mg·Nm⁻³,绝对误差为 21.87 mg·Nm⁻³,相对误差为 3.3%。对作为学习样本的工况 1~11 也进行了验证。

按类似方法建立了锅炉飞灰含碳量特性的神经网络模型,采用与 NO_x 排放特性神经网络模型相同的 29 个输入作为输入节点,飞灰含碳量值作为输出节点,隐含层取 34 个隐节点。采用工况 1~11 对应的 11 组样本数据用来训练神经网络,工况 12 的数据作为校验样本。对于工况 12,模型的飞灰含碳量输出为 1.216%。

各工况的实际测试值,模型估计值和相对误差如表 4.5 所示,可见对于作为学习样本的工况 1~11,模型输出误差很小,而工况 12 作为未学习过的样本,相对误差略有增大。

由于现场试验费时费力,现场进行的工况

表 4 NO_x 实测值与模型输出值比较/ mg·Nm⁻³

Table 4 The comparison of the NO _x experimental value and the calculated value												
工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NO _x 实测值	746.34	732.94	777.87	906.53	784.64	644.75	620.17	713.91	671.72	638.76	632.94	659.32
NO _x 计算值	745.17	733.27	781.40	897.25	787.10	644.8	619.78	714.10	671.98	638.93	633.10	681.19
相对误差/ %	-0.2	0.045	0.45	1.02	0.31	0.008	0.062	0.026	0.039	0.026	0.025	3.3

表 5 飞灰含碳量实测值与模型输出值比较 / %

Table 5 The comparison of the unburned carbon content in fly ash of experimental value and the calculated value

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
飞灰含碳实测值	1.09	1.65	1.40	1.43	1.33	1.39	1.29	1.21	1.18	1.13	0.73	1.16
飞灰含碳计算值	1.098	1.639	1.391	1.434	1.329	1.389	1.291	1.210	1.176	1.130	0.728	1.216
相对误差 / %	0.732	- 0.641	- 0.006	0.277	- 0.05	- 0.02	0.073	0.011	- 0.0034	0.002	0.251	4.8

数量有限,影响了根据样本数据建立的神经网络模型的准确性,但目前大型电站锅炉普遍安装了自动化程度很高的集散控制系统(DCS),锅炉的有关操作参数可以由 DCS 实时采集获得,另一方面,随着环保要求的不断提高,很多大型电站锅炉也安装了在线的烟气取样分析系统和飞灰含碳量在线监测仪,可以实时获得锅炉的氮氧化物排放浓度和飞灰含碳量.通过 DCS 的数据接口,可以很容易地获得神经网络所需大量的样本数据,再结合本文提出的建模方法,可获得很好的模型准确性和实用性.

5 结论

(1)大型四角切圆粉煤燃烧锅炉的低 NO_x 燃烧特性受到如煤种、锅炉负荷、配风方式、炉型、燃烧器型式、炉温、过剩空气系数、煤粉细度、风粉分配均匀性等多种因素的影响,其影响关系较为复杂,本文进行了多工况热态试验以摸索大型四角切圆粉煤燃烧锅炉的低 NO_x 燃烧特性.

(2)由于锅炉燃用煤种多变,锅炉不可能保持在试验工况下运行,可通过将热态实炉试验数据作为训练样本,训练人工神经网络,调整、修正神经网络中各权值,建立大型电站锅炉各运行参数与 NO_x 排放特性及燃烧经济性之间关系的神经网络模型,并通过试验值和模型计

算值的比较,证实模型的合理性.

(3)对大型四角切圆粉煤燃烧锅炉,将入炉总燃料量,总空气量,各给煤机开度,各二次风挡板开度,燃尽风挡板开度,省煤器出口氧量,煤种特性,各磨煤机通风量、风箱与炉膛差压作为神经网络的输入向量,NO_x 排放浓度和飞灰含碳量作为神经网络的输出,以模拟锅炉燃用煤种和运行参数与锅炉燃烧特性之间关系,是比较合适的,而且以上参数都可从电厂 DCS 中获得,便于现场运用.

(4)与其它的数学建模方法相比,人工神经网络通过对样本的学习,能够发现其隐含的信息,可避免或减少常用数据分析和建模工作量,由于人工神经网络善于联想,概括、类比和推广,如果学习样本增多,还可在新的条件下进一步训练网络,提高其准确性.

(5)通过人工神经网络建立大型电站锅炉的低 NO_x 燃烧特性模型后,即可根据输入参数预报 NO_x 排放浓度和飞灰含碳量,如果结合全局寻优算法,可以寻找出最优的操作参数,以获得低的 NO_x 排放浓度.

参考文献:

1 Hechi Nielsen R. Theory of the back propagation neural network. Proc of IJCNN, 1989,1:593 ~ 603.
2 焦李成. 神经网络系统理论. 西安:西安电子科技大学出版社,1990.242 ~ 251.