

# 基于遗传算法的燃煤电站锅炉整体燃烧优化方法研究

孙巧玲, 沈 炯, 李益国

(东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 针对电站锅炉燃烧效率和污染物的排放, 提出了一种整体燃烧优化的思想, 并结合遗传算法和人工神经网络技术, 对整体燃烧优化方法进行了研究。仿真结果表明, 采用本文提出的燃烧优化控制方案, 不仅能使锅炉节能, 还能降低排放的烟气中氮氧化物的含量, 减少对环境的污染, 具有较强的可行性。

**关 键 词:** 电站锅炉; 整体燃烧优化; BP 神经网络; 遗传算法;

中图分类号: TK233 文献标识码: A

## 1 引 言

锅炉燃烧控制系统中送风调节回路的任务是保证进入炉膛的燃料充分燃烧。目前大机组普遍采用的控制方案是以氧量为被调量的间接比值控制, 该方法简单易行, 具有一定的动态修正能力。但存在以下缺点:

- (1) 风煤比简单看成负荷(汽压)的单一函数, 近似为比值关系, 而在实际中由于多种因素的影响, 最佳风煤比和负荷是一个复杂的非线性关系<sup>[1]</sup>。
- (2) 对于不同的煤种及煤粉特性, 最佳过剩空气率也有较大变化, 难以实现最优燃烧。
- (3) 目前几乎所有的电站是在机组调试时找出最佳风煤比, 并以烟道含氧量来标志, 一般在 3%~5%。但这只是机组调试时的特定情况, 机组运行一定时间之后, 机械件如风机和燃烧器的老化, 烟道增加的泄漏, 都没考虑。

针对这些缺点, 出现了许多新的风煤比寻优方法<sup>[1~3]</sup>, 但它们仅集中在如何寻找风煤比, 提高锅炉燃烧效率, 却同时增加了氮氧化物的排量, 加重了环境污染<sup>[4]</sup>。

本文兼顾锅炉的燃烧效率和污染物的排放, 应用遗传算法(GA)寻找烟气最佳含氧量, 进而调节送风量, 实现锅炉燃烧的整体优化。寻优过程中对燃烧效率、氮氧化物排放量的预测, 由人工神经网络

(ANN)实现。

仿真研究表明, 采用本文提出的燃烧优化控制方案, 不仅能使锅炉节能, 还能降低烟气中氮氧化物的含量, 减少对环境的污染, 具有较强的可行性。

## 2 燃烧优化控制系统结构

燃烧控制系统送风调节回路的任务是保证进入炉膛的燃料充分燃烧, 使锅炉达到最高的热效率。然而到目前为止, 锅炉热效率不能直接测量, 只能用一些间接方法判断。根据不同的测量方法可以构成不同的系统, 目前大机组一般采用以氧量为被调量的间接比值控制方案<sup>[5]</sup>, 控制系统框图见图 1。

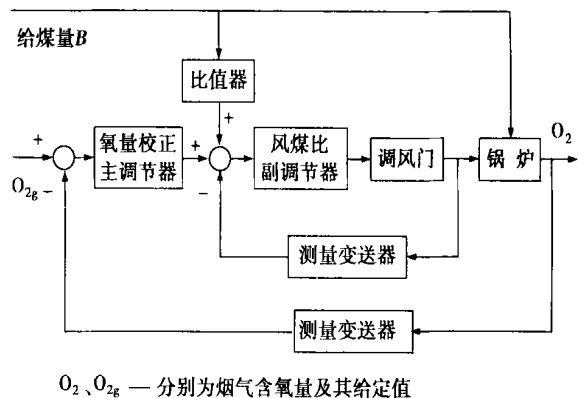


图 1 间接比值控制系统框图

这种方法是燃料量随负荷变化, 空气量通过风煤比跟随燃料量的变化, 同时为保证锅炉处于充分燃烧状态, 增加了送风调节回路的烟气含氧量反馈校正环节。

为了克服在引言中所指出的间接比值控制的缺点, 同时降低锅炉烟气中氮氧化物的含量, 采用遗传算法(GA)寻找烟气最佳含氧量的设定值(即  $O_{2g}$ ),

校正风煤比,从而实现锅炉的高效低污染燃烧。遗传算法实施过程中所需要的对燃烧效率、氮氧化物排放量的预测由人工神经网络(ANN)实现。算法框图如图2所示。

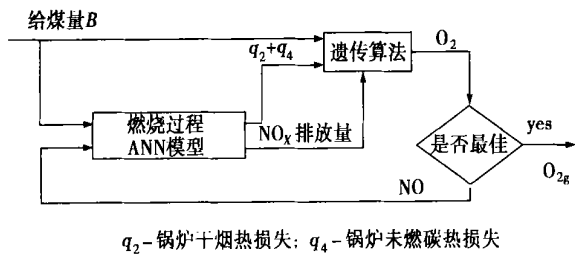


图 2 算法框图

### 3 燃烧过程模型

由图2可知,实现该算法需要模型描述燃烧过程,提供寻优过程中对燃烧效率、氮氧化物排放量的预测。而电厂锅炉燃烧系统是一个多变量、非线性、强耦合的复杂过程,采用常规方法建模具有相当大的难度,因而采用含有一个隐层的BP网络对燃烧过程建模。

#### 3.1 燃烧过程的神经网络模型

本文中以氧量和给煤量为神经网络的输入,两项热损失之和( $q_2 + q_4$ )和  $NO_x$  的排放量为输出建立燃烧过程模型。燃烧过程的神经网络模型见图3。

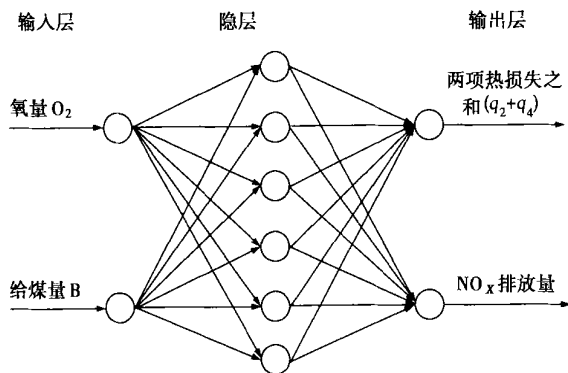


图 3 燃烧过程神经网络模型

#### 3.2 燃烧效率的计算

目前国内锅炉效率的计算标准有两个:美国工程师学会的电站性能试验规程(ASME PTC)和中国国家标准的电站性能试验规程(GB PTC)。进口机组大都采用前者。

但采用 ASME 标准来计算锅炉效率,是一种实

验室中严格的性能测试准则,很多数据难以准确、快速地获得。本算法中并不需要精确的燃烧效率值,只需选择一种综合参数能够反映出燃烧状况的好坏即可,因此我们选择两项最大损失——锅炉干烟气热损失和未燃炭热之和来判断燃烧效率的变化,计算公式如下:

锅炉干烟热损失的计算公式:

$$q_2 = [0.4 + 3.55 \times (0.1 + \frac{21}{21 - y_l})] \times (t_{py} - t_{jf}) \times \frac{100 - q_4}{10000} \quad (1)$$

式中:  $y_l$  — 氧量, %;  $t_{py}$  — 排烟温度, °C;  $t_{jf}$  — 进风温度, °C;

锅炉未燃炭热损失的计算公式:

$$q_4 = 4.1868 \times 7850 \times \frac{hf}{drl} \times (\frac{0.9 \times fht}{100 - fht} + \frac{0.1 \times hzt}{100 - hzt}) \quad (2)$$

式中:  $hf$  — 灰分, %;  $drl$  — 低位发热量, kJ/kg;  $fht$  — 飞灰含炭量, %;  $hzt$  — 底渣含炭量, %。

### 4 遗传算法

遗传算法的基本操作包括适应度函数、编码、选择、交叉和突变。由于其计算量较大,较费时,一般都是离线进行,应用范围也多集中在一些静态优化问题上。本文应用遗传算法实时调整烟气含氧量的给定值,以使锅炉的燃烧效率和污染物的排放达到最优。

#### 4.1 适应度函数的选取

遗传算法的优化目标为:在某个工况下,给定一定的煤量,求最优的氧量,使得效率和排放最优。

据此,本文中适应度函数采用如下形式:

$$J = 1 / (t_1 \times J_{eff} + t_2 \times J_{NO_x}) \quad (3)$$

式中:  $J_{eff}$  — 效率的评价函数,直接取为神经网络的输出  $q_2 + q_4$ ;

$J_{NO_x}$  —  $NO_x$  排放量的评价函数,取为神经网络的  $NO_x$  排放量输出值;

$t_1, t_2$  — 上述两个评价函数的加权系数,数值取决于对效率和排放的关注程度。

#### 4.2 遗传操作

遗传操作包括复制(选择)、交叉和突变,是遗传算法的最关键部分。

为维持群体的多样性,本算法的复制过程仅采用遗传操作过程中父子代的最佳个体取代最差个

体, 其它个体保持不变。交叉和变异保留操作前后适应度较大的个体, 这不仅保证了算法的收敛速度, 而且避免了算法后期因突变可能造成的不收敛, 从而突变概率可以取的较大, 扩大了搜索的范围, 该算法的流程如图 4 所示。

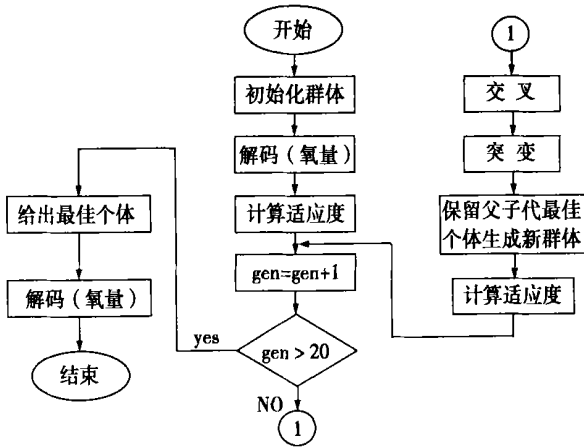


图 4 遗传算法的流程图

## 5 仿真

以利港电厂 3 号炉为优化控制对象, 进行仿真计算。

利港电厂 3 号炉由武汉锅炉厂采用英国 BEL (Babcock Energy Limited Co.) 公司的技术制造, 型号为 WGZ1246/18.15-1。锅炉设计燃用晋北煤, 设计效率为 92.66%。本机组所燃煤种的元素分析如表 1 所示。

表 1 机组所燃煤种的元素分析

全水 分/%	空气 干燥基 水分/%	收到基 灰分/%	干燥无 灰挥发 分/%	收到 基碳/%	收到 基氢/%	收到 基氧/%	收到 基氮/%	收到 基硫/%	收到基 低位发热 量/MJ·kg <sup>-1</sup>
12.17	1.43	11.68	30.97	63.61	3.44	7.79	0.76	0.45	23.92

### 5.1 建立基于神经网络的燃烧过程模型

#### 5.1.1 样本采集

采用含有一个隐层的 BP 网络对燃烧过程建模, 样本数据从利港电厂 3 号炉的 DAS 系统中获得, 测量过程中间接比值控制系统不投自动。计算过程中所需的数据有: 负荷, MW; 给煤量, t/h; 氧量, %; 排烟温度, °C; 飞灰含炭量, %; NO<sub>x</sub>, mg/m<sup>3</sup>。

根据测得的数据, 由式(1)和式(2)计算损失的效率, 即可得到样本集。由于输入样本集中输入参数的取值范围不同, 参数大小不一, 为使各参数所起的作用大致相同, 需要先对输入数据进行归一化处

理。

#### 5.1.2 训练神经网络

神经网络的隐层采用对数 S (logsim) 型函数; 输出层采用线性函数 (purelin)。应用 L-M 算法训练神经网络, 训练精度为 0.000 001, 最大训练步数为 1 000。经反复训练知隐层中神经元个数取 6 时, 网络的泛化能力最好。

取隐层中神经元个数为 6, 利用归一化后的样本数据训练神经网络, 即可得到神经网络的权值和阈值。

### 5.2 应用遗传算法寻求烟气最佳含氧量

遗传算法的编码策略采用常用的二进制, 串长度选为 16 位, 氧量的变化范围取为 1%~6%。适应度函数为:

$$J = 1 / (0.4 \times J_{\text{eff}} + 0.6 \times J_{\text{NO}_x}) \quad (4)$$

遗传算法参数如下:

遗传代数  $t = 20$ ; 群体规模  $m = 30$ ; 交叉概率  $P_c = 0.9$ ; 突变概率  $P_m = 0.8$ 。选择一个工况作仿真计算, 计算结果见表 2, 表 3 为该工况的实炉测试值。

表 2 仿真结果

工况号	负荷/MW	给煤量/t·h <sup>-1</sup>	氧量/%	q <sub>2</sub> +q <sub>4</sub> /%	NO <sub>x</sub> /mg·m <sup>-3</sup>
1	340	140	1.531 9	4.962	654.9

表 3 实炉测试值

工况号	负荷/MW	给煤量/t·h <sup>-1</sup>	氧量/%	q <sub>2</sub> +q <sub>4</sub> /%	NO <sub>x</sub> /mg·m <sup>-3</sup>
1	340	140.1	3.5	4.751	672
2	341	140.2	4	4.573	717
3	340	140.2	4.4	4.533	736
4	340	139.9	5.1	4.544	798

将表 2 中用遗传算法寻优得到的数据与表 3 中的实炉测试值比较可见, 本遗传算法寻得的氧量值较小, 损失效率有所增大, 但锅炉烟气中氮氧化物的含量有明显降低。这表明采用燃烧优化控制系统在保证锅炉效率的前提下, 降低排放的烟气中氮氧化物的含量, 减少对环境的污染。

该工况下的仿真图见图 5~图 7。

从图 6 中可以看出, 本遗传算法不到十代就已收敛, 而且整个过程也不过十几秒, 能够满足实时性的要求。

由图 7 中损失效率、氮氧化物含量随烟气含氧量的变化曲线, 可知随着锅炉烟气中氧气含量的增

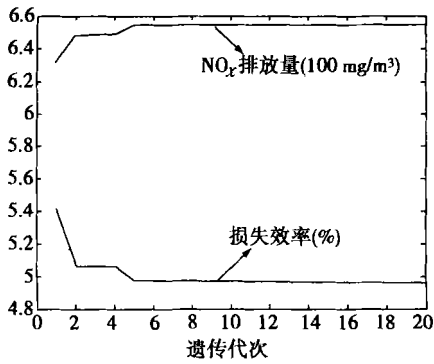


图5 损失效率及NO<sub>x</sub>排放量随进化代次的变化曲线

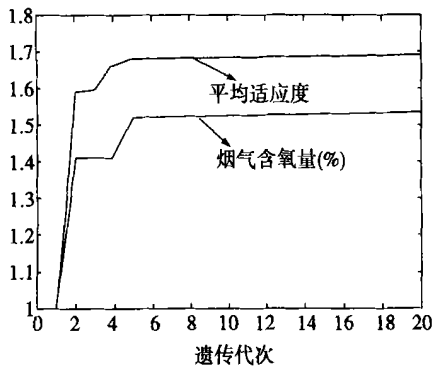


图6 平均适应度及烟气含氧量随进化代次的变化曲线

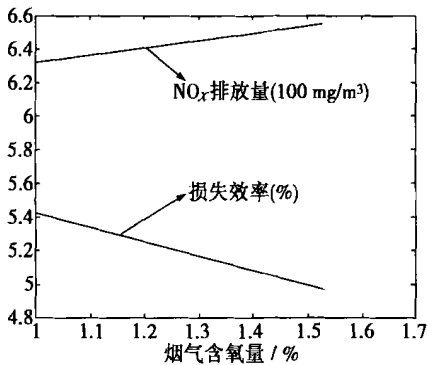


图7 损失效率及NO<sub>x</sub>排放量与烟气含氧量的关系

加, 损失效率减少, 烟气中氮氧化物含量增加, 与理论相符<sup>[3~4]</sup>, 可见本文所提出的神经网络模型能较好的反映锅炉的燃烧过程。

## 6 结 语

在利用神经网络对燃烧过程建模的基础上, 采用遗传算法在线寻求氧量的给定值, 调节送风量, 使得风煤比不再是负荷的单一函数, 提高了控制的精度, 降低了锅炉烟气排放对环境的污染。当锅炉燃烧的煤种发生变化, 或系统运行一段时期之后, 测得的氮氧化物含量过高时, 可以重新训练神经网络, 从而避免了煤种特性对过剩空气系数的影响, 实现整体燃烧优化。

## 参考文献:

- [1] 王耀青, 刘 薇. 在线调节风煤比实现经济燃烧控制[J]. 中国电力, 1997, 30(2): 14-19.
- [2] 王耀青, 刘 薇. 燃烧控制系统最佳风煤比曲线的在线自学习算法[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(3): 83-87.
- [3] 乌显塘. 工业锅炉燃烧优化控制[J]. 自动化仪表, 1988, 9(6): 20-23.
- [4] 曾汉才, 姚 斌. 关于我国大型锅炉NO<sub>x</sub>排放评价及其排放标准修订的建议[J]. 锅炉制造, 2001(4): 1-7.
- [5] 熊淑燕, 王兴叶. 火力发电厂集散控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [6] 周跃花. 燃烧时NO<sub>x</sub>的转化与控制[J]. 西安联合大学学报(自然科学版), 2000, 3(4): 70-74.
- [7] 刘妹琴, 邓燕妮, 廖晓昕. 实时遗传算法在位置伺服系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 5-93.
- [8] LINKENS D A, NYONGESA H O. Genetic algorithms for fuzzy control[J]. Control Theory Appl, 1995, 142(3): 161-185.
- [9] 林 波. 基于遗传算法的优化燃烧控制系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.

(何静芳 编辑)

## 更 正

因校对疏忽, 2003年第6期目次页简讯一栏(559)应为(599); 593页图2中“← →”应去掉。特此更正, 并向作者、读者致歉。

——编辑部

temperature air entering a combustion furnace and its flow speed is in no way related to the opening degree of the forced draft fan, but they will increase with an increase in the opening degree of the fume exhaust fan. **Key words:** high-temperature air generator, cold-state experiment, biomass energy, high-temperature air gasification

**孔隙结构对石灰石脱硫性能的影响 = The Influence of Pore Structure on the Desulfurization Performance of Limestone** [刊, 汉] / LIU Xian-zhou, ZHAO Chang-sui, QIAN Xiao-dong, et al (Shandong Provincial Consulting Institution of Electric Power Engineering, Shandong Ludian Environmental Protection Co., Jinan, China, Post Code: 250100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 77 ~ 80

After undergoing flashing and expansion on a solid-particle pore diameter expansion device limestone particles were investigated for their desulfurization performance on a gas-flow reactor. The results of the investigation indicate that after expansion of the limestone pore diameter there was a relatively great improvement of the transport properties of reaction gases due to an enhancement in the cross-linking quality among the pores, thus decreasing the influence of sintering in the pyrolysis process. As a result, the desulfurization activity in the pore inner surface has increased. Hence, under identical test conditions after the expansion of the pore diameter there will be a significant increase in the desulfurization efficiency of the limestone. **Key words:** flashing, limestone, hole structure, desulfurization

**汽轮机最有利真空循环水泵变频驱动控制系统 = A Variable-frequency Drive Control System of a Circulating Water Pump for Allowing a Steam Turbine Unit to Operate at an Optimum Vacuum** [刊, 汉] / ZHANG Cheng-hui, CHENG Jin, XIA Dong-wei (Institute of Control Science & Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 81 ~ 84

Currently, thermal power plants adopt in most cases a throttle-governing mode for regulating the flow rate of circulating water. Such a regulating method suffers from poor control effectiveness and is incapable of ensuring that a steam condenser operates at a most favorable vacuum. Moreover, it also results in a high power consumption of circulating water pumps. In view of the above, the authors have developed a variable-frequency speed-governing system, using a programmable logic controller (PLC) to design a rational control logic. This makes it possible to realize a stable start-up, shutdown and the switching-over of the circulating water pumps, thus providing a steam turbine unit with an optimum vacuum for its economic operation. The economic operating modes of the steam turbine unit are analyzed and a method for calculating optimum vacuum values is given along with a detailed description of the system control theory, hardware configuration and PLC program design. Furthermore, some fruitful application results are presented. **Key words:** thermal power plant, optimum vacuum, programmable logic controller, variable frequency governing, proportional-integral-differential control

**基于遗传算法的燃煤电站锅炉整体燃烧优化方法研究 = Genetic Algorithm-based Integrated Optimization of a Combustion Process for a Coal-fired Utility Boiler** [刊, 汉] / SUN Qiao-ling, SHEN Jiong, LI Yi-guo (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 85 ~ 88

Concerning the combustion efficiency and pollutant emissions of utility boilers a concept is proposed concerning the integrated optimization of a combustion process. In combination with a genetic algorithm and the techniques of an artificial neural-network an investigation was performed of the method of integrated optimization for a combustion process. The results of a simulation indicate that the system of optimized combustion control proposed by the authors can lead not only to sizable energy savings but also to a decrease in nitrogen oxide emissions by flue gases, contributing to a reduction in environmental pollution. Because of the foregoing the proposed system has a great potential for engineering applications. **Key words:** utility boiler, integrated optimization of combustion, BP neural network, genetic algorithm

**简单循环船用燃气轮机间冷回热改造方案探讨 = Exploratory Study of a Modification Scheme Incorporating Intercooling and Regeneration for a Simple-cycle Marine Gas turbine** [刊, 汉] / XIAO Dong-ming, WEN Xue-you