

中小型煤粉炉的运行优化

吕泽华, 徐春晖

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘要: 提高中小型煤粉炉的运行效率, 控制其在最佳风煤比运行一直是个难题, 原因是最佳风煤比是随炉况、负荷、煤种变化的, 是非定常的。本文由计算锅炉效率的反平衡法出发, 以炉膛出口温度和排烟温度为主导因素, 论证得到寻求最佳风煤比的热效率判据, 进而由自学习系统建立知识库, 得到以负荷和煤种为参变量, 以表征最佳风煤比的烟气含氧量应变量的二维模糊决策表, 解决了如何在线实时控制中小型煤粉炉高效运行的难题。

关键词: 最佳风煤比; 热效率判据; 模糊决策表; 运行优化

中图分类号: TK229.6 文献标识码: B

1 前言

如何提高中小型煤粉炉的运行效率一直是困扰工程技术人员的一个难题。由于煤粉炉的热效率无法在线测量, 也就难以调节风量, 使炉子能在高效的最佳风煤比处运行。现行的一般作法是以烟气含氧量的大小来表征最佳风煤比和炉子效率的状况, 如某130 t/h煤粉炉运行规程中规定, 烟气含氧量应在2.74~4.22之间。仅给出范围而非定值, 原因是热效率是非定常的, 其与炉子复杂的热力系统的状况、炉子的负荷及所使用的煤种是相关的。要解决此问题有两个难点, 一是炉子的热效率如何在线测量, 二是要掌握当前的炉子热效率与煤种和负荷的关系。本文避开热效率在线测量准确数值的难点, 而是由热效率反平衡计算出发, 提出和推证了当调节风量时, 热效率如何变化的判据, 借以寻求最佳风煤比来提高运行效率。在此基础上, 进而由自学习系统, 根据运行数据建立知识库, 以负荷和煤种为参变量, 以最佳烟气含氧量为应变量, 建立二维模糊决策表, 以便控制风量使炉子能在线运行在最佳风煤比处来提高运行效率。

2 热效率判据

由热效率计算的反平衡法出发, 以炉膛出口烟气温度和排烟温度为主导参数, 当风量变化引起烟气含氧量变化时, 根据炉膛出口烟气温度和排烟温度的变化来判断锅炉热效率变化的趋势。

2.1 炉膛出口烟温与炉膛辐射热

总送风量的改变对炉膛出口烟气温度的影响可以分为两个方面: (1) 燃烧状态发生变化(炉膛辐射热和燃烧效率的变化), 使炉膛火焰平均有效辐射温度发生变化, 进而炉膛出口烟气温度发生变化; (2) 燃烧状态未发生变化, 仅仅由于进出炉膛的物理焓的变化, 引起炉膛出口烟气温度的变化。用公式来表示:

$$dT_g = \frac{\partial T_g}{\partial \alpha_{py}} d\alpha_{py} + \frac{\partial T_g}{\partial Q_f} dQ_f \quad (1)$$

式中: α_{py} ——过量空气系数; T_g ——炉膛出口烟气温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_f ——炉膛辐射热, kJ/s 。

对炉膛列出能量平衡式:

$$Q_f = BQ_d^y \eta + A(C_a T_a - C_{a0} T_0) + BC_m(T_b - T_0) - G_a(C_{ga} T_g - C_{a0} T_0) - G(C_g T_g - C_{g0} T_0) \quad (2)$$

式中: G_a ——烟气中的空气量, kg/s ; T_b ——煤粉温度, $^{\circ}\text{C}$; G ——燃烧生成的干烟气量, kg/s ; T_a ——送风温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_d^y ——煤种低位发热量, kJ/kg ; T_0 ——基准温度, $^{\circ}\text{C}$; B ——进入炉膛的煤粉量, kg/s ; η ——燃烧效率; A ——进入炉膛的空气量, kg/s ; C_m ——煤粉的比热, $\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$; C_a ——空气在 $0 \sim T_a$ 温度下的平均定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$; C_{a0} ——空气在 $0 \sim T_0$ 温度下的平均定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$; C_{ga} ——空气在 $0 \sim T_g$ 温度下的平均定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$; C_g ——烟气在 $0 \sim T_g$ 温度下的平均定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$; C_{g0} ——烟气在 $0 \sim T_0$ 温

收稿日期: 2000-12-13; 修订日期: 2001-02-26

基金项目: 国家攀登计划 B 基金资助项目(85-35)

作者简介: 吕泽华(1945—), 男, 天津人, 清华大学教授

度下的平均定压比热, kJ/(kg·°C)。

式(2) 两边对 α_{py} 求导, 并令 $\frac{\partial Q_f}{\partial \alpha_{py}} = 0$, 代入式

(1), 得

$$\frac{\partial T_g}{\partial Q_f} dQ_f = dT_g + \frac{C_{ga}T_g - C_aT_a}{(\alpha_{py} - 1)C_{ga} + (1/G_0 + 1)C_g} d\alpha_{py} \quad (3)$$

2.2 热效率的反平衡计算

按《电站锅炉性能试验规程 GB10184 - 88》, 固态排渣煤粉炉的反平衡效率计算可以作以下简化:

- 煤种的低位发热量作为输入热量;
- 忽略输入物理热及雾化蒸汽带入的热量;
- 过量空气系数计算公式采用 $\alpha_{py} = \frac{21}{21 - O_2}$;
- 忽略气体未完全燃烧损失;
- 忽略磨煤机排出石子煤的热损失;
- 忽略灰渣物理显热损失。

由于要考虑总送风量的变化对锅炉效率的影响, 而这个影响主要体现在排烟损失和固体未完全燃烧损失上, 而与散热损失的关系不是很密切, 所以在此不必考虑散热损失。这样, 只剩下了排烟损失 Q_2 和固体未完全燃烧损失 Q_4 。将这两项损失的公式合在一起, 求全微分, 再结合某 130 t/h 煤粉炉的实际运行数据进行数量级分析, 结合式(2), 忽略掉一些次要因素, 最后得到:

$$d(Q_2 + Q_4) = [(V_{gk}^0)^c C_{pgy} (Q_{py} - t_0) - (C_{ga} T_g - C_a T_a) G_0] d\alpha_{py} + \frac{Q_2}{\theta_{py} - t_0} d\theta_{py} - \frac{dQ_f}{B} - [(\alpha_{py} - 1) \times G_0 C_{ga} + (1 + G_0) C_g] dT_g \quad (4)$$

式中: $(V_{gy}^0)^c$ ——按应用基燃料成分, 由实际燃烧掉的碳计算的理论燃烧干烟气体量, m^3/kg ; C_{pgy} ——干烟气从 t_0 至 θ_{py} 的平均定压比热, $kJ/(m^3K)$; T_0 ——基准温度, $^{\circ}C$; θ_{py} ——排烟温度, $^{\circ}C$ 。

从现场数据整理, 得

$$Q_f = (1.34696T_g - 283.45884)BQ_d^v$$

所以,

$$B \frac{\partial T_g}{\partial Q_f} = 1/(1.34696Q_d^v)$$

上式和式(3) 联立得: $\frac{dQ_f}{B} = 1.34696Q_d^v \times$

$$\left[dT_g + \frac{C_{ga}T_g - C_aT_a}{(\alpha_{py} - 1)C_{ga} + (1/G_0 + 1)C_g} d\alpha_{py} \right] \quad (5)$$

代入到式(4) 中, 并令减少损失:

$$d(Q_2 + Q_4) < 0, \Xi = (\alpha_{py} - 1)G_0C_{ga} + (G_0 +$$

1) C_g , 整理得到热效率判据:

$$dT_g - K_1 \cdot d\alpha_{py} - K_2 \cdot d\theta_{py} > 0 \quad (6)$$

式中,

$$K_1 = \frac{(V_{gk}^0)^c C_{pgy} (\theta_{gy} - t_0)}{1.34696Q_d^v + \Xi} \frac{(C_{ga}T_g - C_aT_a)G_0}{\Xi}$$

$$K_2 = \frac{Q_2}{(\theta_{py} - t_0)(1.34696Q_d^v + \Xi)}$$

当总风量变化, 引起炉膛出口烟气温度 T_g 、过量空气系数 α_{py} 和排烟温度 θ_{py} 变化时, 若它们的变化之和满足上式时, 则锅炉热效率会相应提高。

3 最佳烟气含氧量的模糊决策表

根据热效率判据, 调整风量即可寻找到最佳风煤比和此时相应的最佳含氧量的数值。此技术在青碱 130 t/h 煤粉炉的计算机集散控制系统上得到应用。图 1 给出了寻优的过程。由图可见随着风量的减少和烟气含氧量 α 的下降, 主蒸汽流量相应增大了 6.8 t/h 左右, 提高了锅炉运行的效率。经山东电力科学院测试表明提高效率为 2.93%。

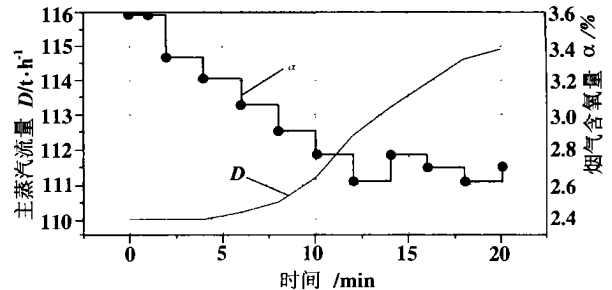


图 1 最佳烟气含氧量的寻优过程

表 1 学习三个月后的模糊决策表 Q_d^v 值变化

N	Q_d^v 值变化				
	1 13~	2 15~	3 17~	4 19~21	
1	110.1~	4.30	3.79	3.53	3.35
2	112.4~	4.16	3.65	3.43	3.24
3	114.7~	4.06	3.55	3.27	3.15
4	117~	3.94	3.43	3.16	3.01
5	119.3~	3.80	3.25	3.05	2.94
6	121.6~	3.60	3.17	2.97	2.82
7	123.9~	3.48	3.05	2.80	2.72
8	126.2~	3.33	2.89	2.70	2.62
9	128.5~	3.18	2.81	2.61	2.46
10	131.8~133.1	3.07	2.65	2.49	2.35

根据现场调查, 发现锅炉负荷、煤种发热量的变化是影响运行工况的主要因素, 所以就选取这两个因素作为自学习的输入变量, 输出变量是最佳烟气含氧量, 学习的结果相当于得到一张二维的模糊控制表, 见表 1。

温度场分析的自适应有限元方法

王璋奇, 安利强

(华北电力大学 机械工程系, 河北保定 071003)

摘要: 自适应有限元方法在实际工程问题的分析中有重要的应用价值。本文根据温度场分析的特点, 给出了温度场有限元计算结果局部误差估计的简单方法, 结合有限元网格生成的 Delaunay 三角化方法, 研究温度场有限元分析的自适应方法, 并在汽轮机转子温度场有限元分析软件中成功实现了温度场的误差估计和有限元网格的自适应自动剖分、加密等功能, 获得了具有等精度的温度场有限元数值计算结果。以国产 300 MW 汽轮机转子温度场分析的有限元网格和计算结果为例, 说明了本文方法的有效性。

关键词: 有限元; 网格剖分; 自适应; 温度场

中图分类号: TB115 文献标识码: A

1 引言

随着计算机技术及数值计算方法的发展, 有限元技术的应用领域不断扩大, 许多大型复杂的结构中物理场分析都采用有限元法。有限元计算中网格的精度直接关系到计算结果的精度, 在有限元实际计算过程中, 往往要求在保证计算精度的前提下, 采用最少的单元, 以减小计算的工作量。但是在计算完成前, 一般不能准确的判断出所分析的物理场的分布情况, 因而无法决定网格的疏密分布, 只能凭经验在梯度可能较大的部位进行网格加密, 这样势必使得网格加密带有一定程度的盲目性, 造成资源的浪费。

工程上要求了解数值计算的具体误差值, 以便判断近似解的可靠程度, 客观上需要求解过程以及

解的特征信息, 以确定计算结果的误差分布状况。这种误差估计与有限元网格生成和改进有机地结合起来, 形成一个渐进地分析过程, 使合乎精度要求的有限元解和网格同步产生, 即自适应有限元过程^[1]。

采用自适应的有限元分析技术, 可以由分析软件根据计算结果的精度, 自动决定网格的密度, 在初次剖分不满足精度要求的局部区域进行自动加密, 极大的提高了计算精度, 减少了有限元前处理的工作量, 使得有限元技术在工程技术中的应用更加广泛。

Delaunay 三角化方法适应于事后的网格局部加密。可通过在原有网格的基础上插入新节点, 然后进行 Delaunay 算法处理, 可以实现网格的自动加密^[2]。本文以此网格剖分算法为基础, 提出了温度场有限元分析的自适应方法, 并在软件中实现。

2 基于 Delaunay 三角化的网格剖分

任意二维区域有限元网格剖分的 Delaunay 算法已经有许多的论述^[1]。其主要实现步骤如下^[3,6]。

(1) 根据给定各边界的权函数生成边界节点(包括内环和外环)。

(2) 将边界节点进行 Delaunay 处理, 生成开端网格。

(3) 根据边界节点的权函数, 逐步生成内部节点, 并进行 Delaunay 处理, 直至满足剖分要求。

按照此剖分方法, 在网格的生成过程中, 内部节

收稿日期: 2001-01-19; 修订日期: 2001-10-18

作者简介: 王璋奇(1964-), 男, 陕西大荔人, 华北电力大学教授, 博士。

由此模糊决策表可以得到如下结论: 当负荷增高和煤种变好时, 调整总风量应使烟气含氧量下降将使锅炉的效率提高。不同煤种、不同负荷时, 烟气含氧量的最佳值可方便地查表得到, 解决了如何使煤粉炉在线运行在最佳风煤比处以提高运行效率的难题。

参考文献:

- [1] 冯俊凯, 沈幼庭. 锅炉原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] 戴绪愚. 自寻最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [3] 徐春晖. 中小煤粉炉燃烧控制的主导因素法[D]. 北京: 清华大学, 1996.

(挥 编辑)

is a solution of series mode. Then, by using a boundary discrete method one can obtain the factor of the series term to be determined. The calculation example indicates that the boundary discrete method can be used to solve not only non-orthogonality boundary problems, but also problems of nonlinear boundary (such as a radiation boundary) value. **Key words:** temperature field, boundary discrete method, non-orthogonality boundary, nonlinear boundary value

一氧化碳作用下铁对一氧化氮的催化还原实验与动力学过程分析 = **Experimental and Kinetics Process Analysis of NO Catalytic Reduction by Iron under the Action of CO** [刊, 汉] / ZHOU Hao-sheng, LU Ji-dong, ZHOU Hu, et al (National Key Lab of Coal Combustion under the Huazhong University of Science and Technology Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —86~89

An experiment and analysis was conducted of the catalytic reduction process of NO by iron under the action of CO. It has been found that at a temperature of 1123 K the conversion rate of NO to N₂ was 70%. A very porous structure resulted after a reaction of NO with Fe and CO. An analysis indicates that under high temperatures the absorption ability of NO on iron oxides is stronger than that of CO, resulting in the presence of iron oxides on the reaction surface. It is assumed that the reaction interface in the reaction process was decided by the slower reaction rate between Fe and NO or between iron oxides and CO. On this basis set up preliminarily was a physical and mathematical model for the above reaction. **Key words:** nitric oxide, iron, catalytic reaction, kinetics

中小型煤粉炉的运行优化 = **Optimized Operation of Medium and Small-sized Pulverized Coal-fired Boilers** [刊, 汉] / LU Ze-hua, XU Chun-hui (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —90~92

The enhancement of operating efficiency of medium and small-sized pulverized coal-fired boilers with their operation controlled at an optimum air-coal ratio has always been a difficult issue. This comes about because the optimum air-coal ratio varies with boiler conditions, boiler load and ranks of coal fired and assumes a non-steady magnitude. Proceeding from the reverse balance method of boiler efficiency calculation and by taking furnace outlet temperature and exhaust gas temperature as major factors the authors have derived by logical reasoning the thermal efficiency judgement criteria for seeking an optimum air-coal ratio. On this basis a knowledge base was set up by a self-study system. As a result, a two-dimensional fuzzy decision table can be obtained. It has the boiler load and coal rank serving as parametric variables and the oxygen content of flue gas, which characterizes the optimum air-coal ratio, serving as dependent variables. This approach has solved the difficult problem of how to attain the high-efficiency operation of medium and small-sized pulverized coal-fired boilers during their on-line and real-time control. **Key words:** optimum air-coal ratio, thermal efficiency judgement criteria, fuzzy decision table, optimized operation

温度场分析的自适应有限元方法 = **Self-adaptive Finite Element Method for the Analysis of a Temperature Field** [刊, 汉] / WANG Zhang-qi, AN Li-qiang (Mechanical Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, Hebei Province, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —92~94

Self-adaptive finite element method has its important application value in the analysis of practical engineering problems. In the light of the specific features of a temperature field the authors have presented a simple method for the estimation of local errors in the finite element calculation of a temperature field. In conjunction with Delaunay triangulation method of finite element mesh generation a study was conducted of the self-adaptive method for the finite element analysis of a temperature field. In addition, the error estimation of the temperature field and other functions, such as automatic division of