

单元机组运行经济性在线数学模型研究

张小桃¹, 王爱军¹, 李艳华¹, 王培红²

(1. 华北水利水电学院 动力系, 河南 郑州 450045; 2. 东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

摘 要: 在电厂实时信息系统的基础上, 开发了实用的单元机组运行经济性在线数学模型。该模型不仅可以对单元机组的主要经济指标进行在线监测, 还可以对机组运行经济性进行诊断分析, 并且已经在电厂应用, 效果良好。

关 键 词: 在线监测; 性能诊断; 经济性; 数学模型

中图分类号: TK264. 9 文献标识码: A

1 引言

随着人们节能降耗意识的日益提高, 机组运行经济性越来越受到重视。目前, 大型机组都装备了实时信息系统, 能实时采集和显示大量的反映机组运行状况的一次数据。利用在线数学模型对一次数据进行实时处理, 在单元机组运行性能诊断系统中形成直观的性能结果。

性能诊断系统功能之一是: 充分利用机组运行参数所反映的技术信息, 提供更多、更直接的反映机组运行经济性的指标数据和能损分析数据, 并将分析结果实时提供给运行人员, 用来指导运行。

单元机组运行经济性在线数学模型是性能诊断系统的核心部分, 主要由以下计算模块组成: 锅炉效率在线计算模型; 锅炉运行经济性诊断分析; 汽轮机运行经济性诊断分析; 热力系统运行经济性诊断分析等。

收稿日期: 2000-05-19; 修订日期: 2000-07-03

作者简介: 张小桃(1967-), 女, 河南焦作人, 华北水利水电学院讲师。

能满足系统的功能要求。

(2) 系统采用变频器通信控制方式是可行的, 保证了系统的可靠性和控制精度。

(3) 该系统只适用于热风送粉的中间仓储式锅炉, 因此具有一定的局限性。但依据我国电站锅炉燃烧管理的现状, 仍具有很强的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 吕震中, 沈炯. 采用变频调速的均衡燃烧计算机控制系统[J]. 动力工程, 1996, 16(4): 47-50.
- [2] 李益国. 均衡燃烧控制系统技术问题研究[D]. 南京: 东南大

2 锅炉效率在线计算模型

锅炉效率在线计算模型需要输入燃料的工业分析成分: Q_d^y (低位发热量), W^s (燃料应用基水分), A^y (燃料应用基灰分) 和锅炉的主要监测参数: O_{2y} (排烟氧量), t_{py} (排烟温度), t_{lk} (冷空气温度), C_{fh} (飞灰含碳量) 等, 按反平衡法计算锅炉效率 η_b , 公式如下:

$$\eta_b = 100 - l \quad (1)$$

$$l = l_G + l_m + l_{uc} + l_R + l_{um} \quad (2)$$

$$l_G = \frac{C_{pg}}{Q_d^y} (k_1 + k_2 \alpha_{py}) (t_{py} - t_{lk}) \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\alpha_{py} = \frac{21}{21 - O_{2y}} \quad (4)$$

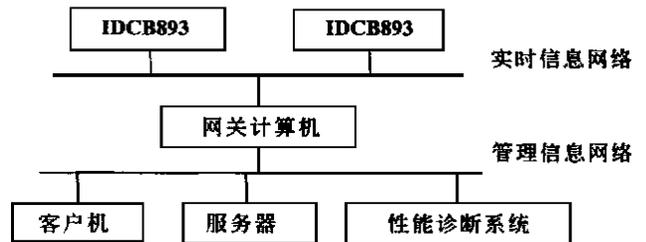


图 1 电厂系统总体配置图

学 1998.

- [3] 王凯, 赵海生, 陈增宏. 煤粉浓度监测系统[J]. 动力工程, 1994, 14(3): 45-48.
- [4] 李雪亮, 武国栋, 杜廷龄, 等. 电站锅炉燃烧分析与诊断系统[J]. 中国电力, 1998, 31(1): 14-17.
- [5] 陈钢, 丘纪华, 张志国. 煤粉浓度对火焰温度影响的试验研究[J]. 热能动力工程, 1994, 9(2): 70-72.
- [6] 王占强. 8031 单片机多机系统的实时通信[J]. 工业控制计算机, 1997, 10(1): 10-12.
- [7] 张健. 变频器的计算机监控系统[J]. 工业仪表及自动化装置, 1997, 27(3): 20-23.

(何静芳 编辑)

$$l_m = \frac{C_{p, H_2O}}{Q_d^y} (k_3 + 0.01(k_4 + k_2 \alpha_{py})) (t_{py} - t_{lk}) \cdot 100\% \quad (5)$$

$$l_{uc} = \frac{33730}{Q_d^y} A^y \frac{C_{fh}}{100 - C_{fh}} \cdot 100\% \quad (6)$$

- 式中 l ——热损失总和, %;
 l_G ——干烟气热损失, %;
 l_m ——水分热损失, %;
 l_{uc} ——未燃碳热损失, %;
 l_R ——辐射和对流热损失, 取 $l_R = 0.33\%$;
 l_{um} ——其它热损失, 取 $l_{um} = 0.5\%$;

其中 k_i 为与燃料种类有关的系数, 即相关系数
 $k_i = f(Q_d^y) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$

锅炉效率在线计算模型的特点为:

传统的锅炉效率计算模型需要输入燃料的元素分析成分才能计算。本计算模型只需要输入燃料的工业分析成分, 就可以进行锅炉效率的计算。该模型不仅可以对锅炉方面的主要监控参数 O_2 、 t_{py} 、 t_{lk} 、 C_{fh} 等进行经济性诊断分析, 而且还可以对漏风系数及燃料水份、燃料灰份、燃料低位发热量等的变化进行经济性分析。经过与电厂锅炉性能考核时的计算结果比较, 误差较小, 能够满足电厂性能计算的要求。

3 锅炉运行经济性诊断分析

锅炉运行经济性诊断分析采用的方法是单因素偏差分析方法, 即根据锅炉效率在线计算模型求出各项参数的偏差因子, 再乘以该参数的实际运行值与其基准值(或设计值)的偏差值, 就可以得到各项参数对锅炉效率的影响程度。计算过程如下:

3.1 偏差因子 K_i 的确定

$$K_i = \sum \frac{\partial l_x}{\partial x} \quad (8)$$

式中 x ——任一项监测参数;
 l_x ——含有 x 项的热损失项。

3.2 主要监测参数基准值的确定

主要监测参数的基准值随着机组负荷的变化而变化, 可以对所采集到的参数运行值和相应的锅炉效率在线曲线进行分析整理, 确定主要监测参数的基准值曲线。

3.3 锅炉运行经济性诊断分析

在确定了各参数的基准值及偏差因子后, 就可以根据现场采集的监测数据进行锅炉运行经济性诊断, 其总的计算公式为

$$\Delta \eta_{bi} = K_i \Delta X_i \quad (9)$$

式中 $\Delta \eta_{bi}$ ——运行参数偏差引起的锅炉效率的变化;
 K_i ——各项偏差因子;
 ΔX_i ——锅炉各项运行参数的运行值与基准值的偏差。

由 $\phi_s = -\partial \eta_b$, 可得

$$\Delta b_{si} = -\frac{\Delta b_{bi}}{\eta_{bi}} \cdot b_s \quad (10)$$

式中 b_s ——实时煤耗, $g/(kW \cdot h)$;
 Δb_{si} ——参数变化引起的煤耗变化, $g/(kW \cdot h)$ 。

这样, 就可以计算锅炉主要运行参数的变化对机组煤耗的影响。

4 汽轮机运行经济性诊断分析

汽轮机运行经济性诊断的基本方法是热力学方法, 其主要的监测参数有: 蒸汽初压 p_0 、蒸汽初温 t_0 、再热汽温 t_r 、给水温度 t_{gs} 、排汽温度 p_c 等。当其中任一参数发生变化而其它参数保持不变, 将引起汽轮机热耗变化 \hat{q}_i 。根据其变化规律, 可以拟合出 \hat{q}_i 随参数偏差变化的计算公式, 即

$$\hat{q}_i = a_i \Delta x_0 + c_i \quad (11)$$

其中 $\Delta x_0 = x'_0 - x_0$
 式中 x'_0 ——任一汽轮机监测参数运行值;
 x_0 ——对应参数的基准值;
 a_i ——不同负荷下对应的偏差系数;
 c_i ——拟合常数。

由于不同的机组负荷对应不同的热偏差系数 a_i , 因此可以拟合出随机组负荷变化的参数热偏差系数 $k_{x_{0i}}$, 即

$$k_{x_{0i}} = f(n_0) \quad (12)$$

式中 n_0 ——运行负荷与设计负荷的比。

任一运行参数偏差引起机组相对热耗的变化公式为:

$$\hat{q}_i = k_{x_{0i}} \Delta x_0 + c_1 \quad (13)$$

由 $\phi_s = \hat{q}_i$
 可得 $\Delta b_{si} = \hat{q}_i \cdot b_s$

这样就可以计算出汽轮机主要监测参数偏差对

机组煤耗的影响。

5 热力系统运行经济性诊断分布

热力系统主要研究加热器端差、抽汽压损、高加旁路泄漏量等的运行能量损失。

现在来分析加热器端差变化对经济性的影响: 当某一加热器端差改变 $\Delta\tau_i$ 时, 新蒸汽等效焓降增加 ΔH_i , 循环吸热量改变 ΔQ_i , 则装置效率变化为

$$\delta\eta_i = \frac{\Delta Q\eta_i - \Delta H}{H - \Delta H} \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\text{或} \quad \delta\eta_i = \frac{\Delta H}{H} \cdot 100\% \quad (15)$$

经过对以上计算公式分析整理, 可以得到以下计算公式, 即

$$\delta\eta_i = K_{ix} \Delta\tau_i \cdot 100\% \quad (16)$$

式中 K_{ix} —— 加热器在某一负荷下对应的端差偏差因子。

分析表明, 在同一负荷下, K_{ix} 变化较小, 可视为定值; 在不同负荷下, 可以求出不同的 K_{ix} 。通过对几种典型工况(30%、50%、75%、100% 负荷)下各加热器单位端差变化对机组经济性的影响的计算, 可以求出各加热器的偏差因子 K_i , 进而拟合成偏差因子随负荷变化的计算公式, 即

$$k_i = f(n_0) \quad (17)$$

同样, 可以求出任一负荷下不同加热器对应的偏差因子, 当实测出其端差变化值时, 就可以计算出加热器端差变化对机组经济性的影响, 即

$$\delta\eta_i = K_i \Delta\tau_i \cdot 100\% \quad (18)$$

$$\text{由 } \delta\eta_s = \delta\eta_i \text{ 可得 } \Delta b_{s_i} = \delta\eta_i \cdot b_s$$

同理也可以计算出加热器端差、抽汽压损、高加旁路泄漏量等的运行能量损失。

6 应用实例

下面是单元机组运行经济性在线数学模型在电厂应用的实例, 采集的运行结果如下。

结果分析: 表 1 是在不同工况下计算的锅炉效率。从表 2 可以看出, 随着机组负荷的变化, 运行参数的运行值和基准值都是变化的。如果主要运行参数的运行值与基准值的变化方向相反, 使运行参数的偏差增大, 就会使机组的煤耗增大很多。这样就应对运行机组加以调节, 以减小偏差, 降低机组煤耗。从以上运行参数引起机组煤耗的变化来看, 单位排汽压力引起的机组煤耗的变化最大, 单位再热压损

引起的煤耗变化次之。

表 1 锅炉效率在线计算结果

项 目	工况一	工况二	工况三
未燃碳热损失 / %	0.619	0.638	0.622
干烟气热损失 / %	6.381	5.881	7.543
水分热损失 / %	0.505	0.462	0.496
其它热损失 / %	0.830	0.830	0.830
总损失 / %	8.335	7.811	9.491
锅炉效率 / %	91.665	92.189	90.509

表 2 机组运行经济性诊断分析

项 目	基准值		运行值		煤耗变化	
					/ g · (kW · h) ⁻¹	
	工况一	工况二	工况一	工况二	工况一	工况二
排烟温度 / °C	125.3	117.4	136.0	126.4	1.982	1.936
排烟氧量 / %	5.472	7.435	6.448	8.200	1.670	1.228
飞灰含碳量 / %	0	0	3.670	3.780	1.115	1.259
漏风系数 / %	0	0	19.5	11.2	2.690	1.452
主蒸汽压力 / MPa	13.24	13.24	13.49	13.53	-0.126	-0.225
主蒸汽温度 / °C	535.0	535.0	540.0	538.1	-0.343	-0.190
再热汽温 / °C	535.0	535.0	541.0	537.1	-0.217	-0.105
再热压损 / %	10.0	10.0	9.31	10.28	-0.200	0.856
排汽压力 / MPa	4.9	4.9	4.71	4.22	-0.800	-3.02
给水温度 / °C	243.55	224.9	242.7	227.1	0.032	-0.290

表 3 各工况下热力系统运行经济性诊断分析

项 目	工况一	工况二	工况三	
1 号高加	端差变量 / °C	0.774	-1.314	-2.01
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.022 84	-0.036 09	-0.048 63
2 号高加	端差变量 / °C	3.346	1.907	0.50
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.002 577	0.015 81	0.012 10
4 号低加	端差变量 / °C	6.30	6.122	6.093
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.058 02	0.054 84	0.055 32
5 号低加	端差变量 / °C	2.01	1.4	1.2
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.023 89	0.017 28	0.014 51
6 号低加	端差变量 / °C	5.078	5.62	6.09
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.099 69	0.104 9	0.118 0
7 号低加	端差变量 / °C	7.112	3.61	2.343
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.132 4	0.068 00	0.045 4
一次喷水量	运行变量值 / T · h ⁻¹	1.683	4.493	3.523
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0.04	0.104	0.070
二次喷水量	运行变量值 / T · h ⁻¹	0	0.244	0.053
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0	0.063	0.010
高旁泄漏率	运行变异值 / %	0.003 8	0.002	0.005
	煤耗变量 / g · (kW · h) ⁻¹	0	0	0.001

从表 3 可以看出, 1 号高加和 2 号高加端差基本上在正常范围内变化, 并且随着机组负荷降低而减小。而 4 号低加端差较大, 因此引起的机组煤耗变化较大。6 号低加端差虽然比 4 号加热器端差小, 但其引起的机组煤耗变化并不小于 4 号加热器,

主要是因为6号低加的偏差因子较大。在不同工况下,一次喷水都有一定的运行值,并且总会使机组煤耗增大。在正常运行工况下,二次喷水并不一定投入,其常作为事故喷水对再热汽温加以微调。一旦二次喷水投入使用,其对机组经济性的影响是不能忽视的。从表上可以看出,单位二次喷水量对机组煤耗的影响远大于单位一次喷水量变化对机组煤耗的影响。由于高加旁路泄漏率较小,其对机组煤耗变化的影响并不大。

7 结语

基于火电厂实时信息系统和电厂一次采集数据开发的机组运行经济性在线数学模型,具有如下主要特点:

(1) 提出了一种只需要输入燃料的工业分析成分和锅炉主要监测参数就可以在线计算锅炉效率的新的计算模型。它不仅可以在线计算锅炉效率,还可以对锅炉主要的运行参数及煤质变化进行诊断分析。

(2) 在传统热力学方法和单因素偏差分析方法

的基础上,开发了在变工况下,计算汽轮机主要运行参数偏差因子的方法,为汽轮机经济性诊断提供了快捷、正确的算法,从而使单元机组运行性能诊断系统直接反映运行经济性指标和诊断实时数值,以指导经济组织电厂运行。

(3) 利用等效焓降理论,提出了计算热力系统主要监测参数偏差因子的方法,开发了实用的热力系统主要参数在线能损数学模型。

参考文献:

- [1] ASME PTC4. 1, 1973, 锅炉机组性能试验规程[S].
- [2] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社 1994.
- [3] 王乃宁. 汽轮机热力设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [4] 任浩仁, 李蔚, 盛德任, 等. 火电厂变工况下运行指标应达值的分析[J]. 中国电机工程学报, 1999(9): 50-56.
- [5] 张小桃, 王培红. 一种新的锅炉效率计算模型[J]. 电站系统工程 1999, 15(4): 16-24.
- [6] 张小桃, 王培红. 锅炉运行经济指标的热偏差分析[J]. 电站系统工程, 1999, 15(6): 7-9.

(何静芳 编辑)

(上接第 385 页)

蒸发散热增大,液膜本身带走的热量减少,其换热强度下降。换热系数随 s_t 增大而下移,但当 s_t 增大时膜厚减小加快,换热系数的增大也加快,所以换热系数曲线增长的斜率增大。在图6中,示出了 s_t 不变时,换热系数随剪切力的变化,在这种情况下,换热系数仍沿流向增大,但增大的速率差别不明显,这时因为当 s_t 不变时蒸发率不变,而 s 增大,表明流动受阻,膜厚增大,故换热系数向下平移。

4 结论

作者分别以 s 和 s_t 代表液膜在自由表面上的剪切力和蒸发散热的强度,对自由表面上剪切力和蒸发散热对过冷液膜传热的影响从理论上进行了分析,分析表明,表面剪切力阻碍了流动,因而降低了

传热性能,而表面上的蒸发减少了液膜本身带走的热量,从而也使液膜的传热性能下降,但由于蒸发使膜厚沿流向减小,使液膜的传热性能沿流向增大。

参考文献:

- [1] SACK M. Falling film shell-and-tube heat exchangers[J]. **Chem Eng** 1967, 63: 55-61.
- [2] HENDRICKS R C, SIMONEAU R J, DUNNING J W Jr. Heat transfer in space power and propulsion systems[J]. **Mech Eng** 1986, 41-52.
- [3] YIH S M. Handbook of Heat and Mass Transfer[M]. Texas: Gulf Publishing Corp, 1986.
- [4] AMBROSINI W, MANFREDINI F, ORIOLO F, et al. Heat transfer from a plate cooled by a water film with countercurrent air flow[J]. **Nuclear Technology**, 1995, 112: 227-236.

(何静芳 编辑)

国家科学基金项目稿件优先发表

自由表面摩擦和蒸发对过冷下降液膜传热的影响 = **The effect of Free Surface Friction and Evaporation on the Heat Transfer of Sub-cooled Falling Liquid Film** [刊, 汉] / SHI Jin-sheng, CHEN Yu-zhou (China National Atomic Energy Research Academy, Beijing, China, Post Code: 102413) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 383 ~ 385, 392

A theoretical analysis was conducted of the heat exchange characteristics of a falling liquid film under the condition of evaporative heat dissipation and of the presence on the free surface of a reverse shearing force. As a result, obtained was a non-dimensional relation of the film thickness and heat exchange factor. Also discussed was the influence of shearing force, liquid film Reynolds number, wall surface heat flux and evaporation rate on the flow and heat transfer. **Key words:** falling liquid film, reverse flow, heat transfer

均衡燃烧控制系统总体设计及关键技术问题研究 = **A Study of the Integrated Design of a Harmonious Combustion Control System and Its Related Technical Issues** [刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Joing, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 386 ~ 388

In light of the problems currently existing in the boiler combustion process of a 200 MW power plant in China the authors have designed a harmonious combustion control system. On the basis of the functional requirements of the system and the specific control mode of an inverter proposed is an integrated design scheme of the combustion control system. The communication control of the inverter represents a key issue in implementing the above design scheme. Briefly discussed is a method of the inverter output control realized through the use of a master-slave type of multi-machine communication mode. **Key words:** harmonious combustion, inverter, communication

单元机组运行经济性在线数学模型研究 = **Research on an On-line Mathematical Model for the Evaluation of the Cost-effectiveness of a Monoblock Unit Operation** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-tao, WANG Ai-jun (Power Engineering Department, North China Institute of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou, Henan Province, China, Post Code: 450045), WANG Pei-hong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 389 ~ 392

On the basis of the real-time information system of a power plant developed is an on-line practical-for-use mathematical model for evaluating the operation cost-effectiveness of a monoblock unit. The model can not only conduct an on-line monitoring of the major economic indexes of the monoblock unit, but also diagnose and analyze its operating cost-effectiveness. Its use at a power plant has been proved to be quite fruitful. **Key words:** on-line monitoring, performance diagnosis, cost-effectiveness, mathematical model

锅筒式锅炉差压式水位计的温度补偿研究 = **Temperature Compensation Study of the Differential-pressure Water Gage Used for a Drum Boiler** [刊, 汉] / YANG Fei, CHEN Guang-hua (Power Engineering Department, Northern Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 393 ~ 394

Due to its location in an atmospheric air environment the reference water column of a differential-pressure water gage is inevitably subjected to the influence of the change in environmental conditions. In the design of the present-day differential-pressure water gage either no temperature compensation or a temperature compensation of only 50 °C fixed value has been set for the reference water column. Through a numerical calculation analyzed was the influence of the ambient temperature the reference water column temperature of the differential-pressure water gage of a sub-critical drum boiler is being subjected to. Moreover, a simple calculation formula is given to facilitate the achievement of a higher level of precision for the differential-pressure water gage. **Key words:** drum boiler, water gage, temperature compensation

循环流化床锅炉密相区内颗粒的横向扩散研究 = **A Study of the Transverse Dispersion of Solid Particles in the Dense-phase Zone of a Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] / YANG Hai-rui, LU Jun-fu, LIU Qing, et al (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 395 ~ 398

With hot particles serving as tracer ones the radial variation of the latter was measured by the use of thermocouples. A study of the particle transverse dispersion has been conducted in the dense-phase zone of a circulating fluidized bed,