

基于火焰图像处理的炉膛辐射能信号的检测及分析

张师帅¹, 周怀春¹, 彭 敏², 刘武林²

(1. 华中科技大学 动力系, 湖北 武汉 430074; 2. 湖南省电力局 中试所, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 采用基于火焰图像处理的炉膛辐射能信号检测系统对湘潭电厂 300 MW 燃煤机组进行了现场检测, 并对炉膛辐射能信号与机组主要运行参数之间的关系进行了分析, 结果表明, 在一定程度上, 炉膛辐射能信号不仅可以预测机组的实际出力, 还可以反映出炉内的燃烧状况。

关 键 词: 燃煤锅炉; 火焰图像; 炉膛辐射能; 检测方法

中图分类号: TK32; TM621 文献标识码: B

1 引言

电站锅炉燃烧过程的稳定性是机组安全、经济运行的基础, 炉膛燃烧火焰是锅炉燃烧状况最直接、最迅速的表征, 利用炉膛火焰图像来进行锅炉燃烧状况的诊断, 国内外学者已进行了大量研究^{1~3}。本文作者曾提出采用炉膛辐射能信号对锅炉燃料量进行反馈控制的想法, 并根据机理及经验进行了仿真研究⁴, 但目前尚缺乏现场检测这一基础性工作。

据此, 本文作者采用基于火焰图像处理技术的炉膛辐射能信号检测系统对湘潭电厂 300 MW 机组进行了现场检测, 并对结果进行分析, 探寻炉膛辐射能信号与机组主要运行参数之间的关系, 为采用炉膛辐射能信号对锅炉燃料量进行反馈控制奠定基础。

2 炉膛辐射能信号的检测

利用全炉膛看火电视摄取火焰图像, 通过图像采集卡将图像信号送入计算机, 在计算机中进行图像处理, 获得炉膛辐射能信号, 并通过数模转换卡, 将之送入电站机组的 DCS 系统中。现场检测系统示意图见图 1。

基本原理为: 利用彩色 CCD 获取火焰图像, 根据 CCD 摄像机标定结果, 对图像中的红、绿、蓝三原色进行校正。

$$r_{i,j}' = r_{i,j}, g_{i,j}' = c_g \cdot g_{i,j}, b_{i,j}' = c_b \cdot b_{i,j} \quad (1)$$

其中, $r_{i,j}$ 为像素的红色值; $g_{i,j}$ 为像素的绿色值; $b_{i,j}$

为像素的蓝色值; c_g 、 c_b 分别为分量绿色和蓝色的修正系数, 根据对 CCD 摄像机的标定结果求得。

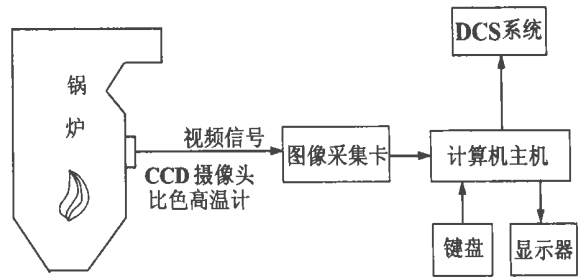


图 1 现场检测系统示意图

选择火焰图像中较亮的像素区域作为参考温度检测区域, 计算该区域中所有像素的红、绿色度值 r_0 、 g_0 , 进而根据双色法测温原理, 计算参考温度 T_0 。

$$T_0 = -C_2 \left[\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right] / \ln \left[\frac{r_0}{g_0} \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \right] \quad (2)$$

其中, λ_1 、 λ_2 分别为彩色 CCD 响应曲线中红、绿色最大响应值所对应的波长; C_2 为常数: $1.4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ 。

根据彩色图像与灰度之间的关系, 计算图像灰度分布:

$$G_{i,j} = 0.11 \times r_{i,j}' + 0.59 \times g_{i,j}' + 0.3 \times b_{i,j}' \quad (3)$$

根据 Wein 辐射定律计算图像温度分布:

$$T_{i,j} = T_0 \cdot \sqrt[4]{G_{i,j}/G_0} \quad (4)$$

其中, G_0 为参考温度检测区域的平均灰度。

定义炉膛辐射能水平:

$$E_c = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (5)$$

其中, σ_0 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数: $5.67 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2\text{K}^4)$; T 为火焰图像平均温度, 取为所有像素点的算术平均值。

为了便于分析, 对炉膛辐射能水平进行归一化处理, 并将其结果定义为: 炉膛辐射能信号。

$$e_c = \frac{E_c}{E_{\max}} = \frac{\sigma_0 \cdot T^4}{\sigma_0 \cdot T_{\max}^4} = \frac{T^4}{T_{\max}^4} \quad (6)$$

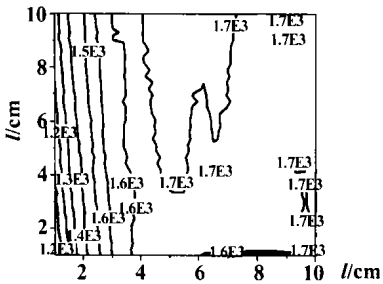
其中, T_{max} 为炉膛平均温度最高水平, 对于 300 MW 锅炉, T_{max} 可取为 $1\ 900\ K^{[5]}$ 。

3 检测结果及分析

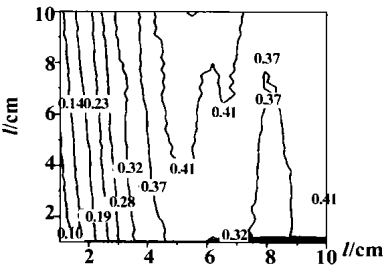
2001 年 5 月 25 日 ~ 28 日, 在湘潭电厂 B 厂 300 MW 锅炉——汽轮机机组上进行了炉膛辐射能信号的检测, 检测结果见图 2。



(a) 火焰图像



(b) 温度分布



(c) 辐射能

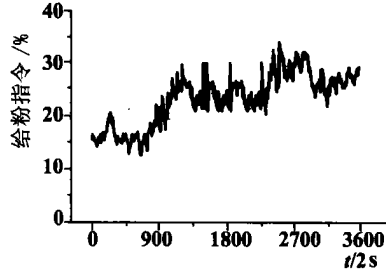
图 2 所对应的机组状况为: 机组稳定运行, 负荷维持在 225 MW 左右。计算得到的 CCD 靶面温度最高值为 $1\ 760\ K$, 最低值为 $1\ 250\ K$, 炉膛辐射能信号为 $0.338\ 6$ 。

为了分析炉膛辐射能与机组各主要运行参数之间的关系, 2001 年 7 月 21 日 ~ 24 日, 在 DCS 系统中对给粉指令、炉膛辐射能信号、热量信号、主汽压力、调门开度指令、机组实发功率以及烟气氧量等参数进行了长时间的采集和记录。现从中选取机组正常运行 2 个小时 (2001 年 7 月 22 日 19 日 ~ 21 时) 的历史数据, 如图 3 所示。

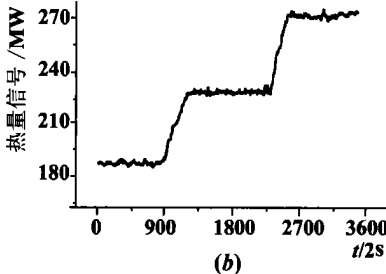
图 3 中显示的过程是, 机组平稳运行在 185 MW 负荷左右。一段时间后, 执行电网调度任务: 升负荷, 负荷由 185 MW 升至 220 MW, 后稳定在 220 MW 左右运行。一段时间后, 又执行电网调度任务: 升负荷, 负荷由 220 MW 升至 265 MW, 后稳定在 265 MW 左右运行。

荷时, 先增大给粉指令, 进入炉膛的煤粉量增加, 结果使得炉膛辐射能信号随之增大, 锅炉蒸汽流量增大, 热量信号增大, 主汽压力升高。为了维持一定的主汽压力水平, 增大调门开度指令, 结果使得机组实发功率随之增大, 以满足电网的要求。

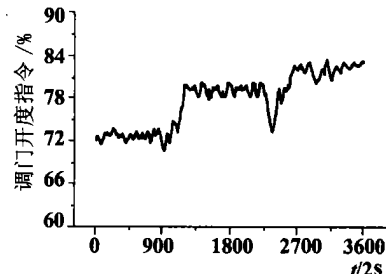
与上述升负荷过程类似, 机组降负荷过程则表现为: 当电网调度任务为机组降负荷时, 先减小给粉指令, 这意味着进入炉膛的煤粉量减少, 结果使实发



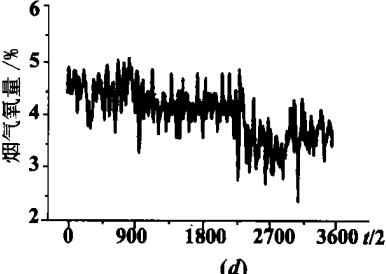
(a)



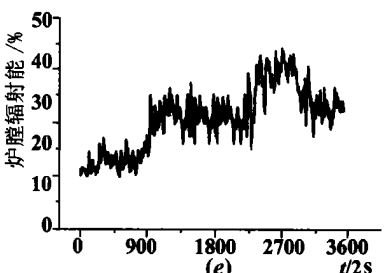
(b)



(c)



(d)



(e)

得炉膛辐射能信号随之减小, 锅炉蒸汽流量减小, 热量信号减小, 主汽压力降低。为了维持一定的主汽压力水平, 此时, 减小调门开度指令, 结果是机组实发功率随之减小, 以满足电网的要求。

对多次机组升负荷、降负荷过程的历史数据进行观察发现, 炉膛辐射能信号增大, 机组实发功率将增大; 炉膛辐射能信号减小, 机组实发功率也将随之减小。一定的炉膛辐射能信号水平对应着一定的机组实发功率水平, 可以说炉膛辐射能信号在一定程度上能够预测机组的实际出力 (负荷) 情况。

为了验证上述观点, 从检

图 2 湘潭电厂火焰图像、温度及辐射能信号检测结果

从图 3 可以看出, 当电网调度任务为机组升负

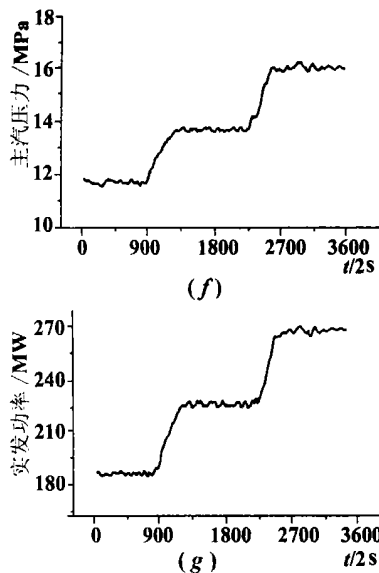


图3 机组运行中炉膛辐射能信号与机组运行参数变化曲线

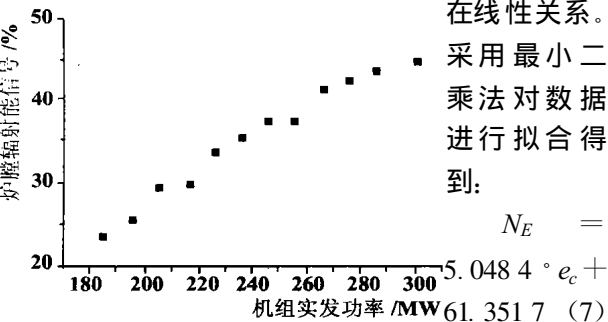


图4 炉膛辐射能信号与机组功率的关系

测记录的大量历史数据中,找出机组在不同负荷下稳定运行时所对应的炉膛辐射能信号,结果列于表1。表1中的数据如图4所示。

从图4可以看出,在180~300 MW负荷范围内,炉膛辐射能信号与机组实发功率之间存在着良好的一一对应关系。考虑到检测系统误差的影响,可以认为两者之间存在线性关系。

采用最小二乘法对数据进行拟合得到:

$$N_E = 5.0484 \cdot e_c + 61.3517 \quad (7)$$

上式为炉膛辐射能信号 e_c 与机组实

发功率 N_E 的静态关系。因此,根据炉膛辐射能信号的检测值,利用式(7),便可以预测机组的实际出力(负荷)情况。

表1 不同负荷下的炉膛辐射能信号

机组实发功率 / MW	185.41	195.63	205.44	215.56	225.58	235.61
炉膛辐射能信号 / %	23.63	25.59	29.54	29.95	33.84	35.61
机组实发功率 / MW	245.56	255.35	265.60	275.43	285.39	300.50
炉膛辐射能信号 / %	37.60	37.89	41.54	42.60	43.88	45.17

另外,从图3还可以看出,当机组实发功率稳定在某一水平时,主汽压力、热量信号两个参数也基本能够稳定在某一水平,而炉膛辐射能信号、烟气氧量则似乎不能稳定在某一水平,而受给粉指令变化的影响。仔细观察还可以发现:给粉指令增大,炉膛辐射能信号增大,烟气氧量却降低。这表明炉膛辐射能

信号与给粉指令之间存在着某种正相关性,烟气氧量与给粉指令之间存在着某种负相关性。

为了进一步探寻机组稳负荷运行下炉膛辐射能信号与机组运行参数之间的关系,选择三组机组稳负荷运行下的数据(185 MW、260 MW 和 300 MW),分别进行炉膛辐射能信号与给粉指令、热量信号、主汽压力、调门开度指令、机组实发功率以及烟气氧量之间的相关性分析,结果见表2。

表2 炉膛辐射能信号与机组运行参数的相关性分析结果

负荷	给粉指令	热量信号	主汽压力	机组功率	烟气氧量
185 MW	0.846 5	0.646 2	0.561 1	0.545 8	-0.831 0
260 MW	0.898 9	0.553 5	0.622 0	0.658 7	-0.785 2
300 MW	0.816 4	0.452 3	0.386 2	0.473 5	-0.823 1

从表2可以看出,机组稳负荷运行下,炉膛辐射能信号与给粉指令之间的相关性较好,最大相关系数均在0.81以上;而炉膛辐射能信号与烟气氧量之间的相关性次之,最大相关系数(绝对值)也均在0.78以上。由此可以推知,炉膛辐射能信号可以一定程度上反映入炉煤粉量的变化,同时还可以反映风煤配比、煤种、煤质的变化。这说明,从宏观角度来看,炉膛辐射能信号能够很好地表征煤粉在炉内的燃烧状况。

4 结束语

采用基于火焰图像处理技术的炉膛辐射能信号检测系统对湘潭电厂300 MW燃煤机组进行了现场检测,并对炉膛辐射能信号与机组主要运行参数之间的关系进行了分析。结果表明,在一定程度上,炉膛辐射能信号不仅可以预测机组的实际出力,还可以反映出炉内的燃烧状况。若采用炉膛辐射能信号对入炉煤粉量进行反馈控制,将有利于提高机组抗燃烧率扰动(内扰)的能力。

参考文献:

[1] MIYAMAES, HASIMOTO H, TAMURA M. Flame diagnostics of pulverized coal boilers[J]. *Combustion Science and Technology*, 1998, 135(3): 135-152.

[2] ZHOU H C, ZHANG S S, HUANG Y L, et al. Monitoring of 2-D combustion temperature images in a 670 t/h Utility Boiler and simulation on its application in combustion control[J]. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 2000, 8(3/4): 311-330.

(下转第182页)

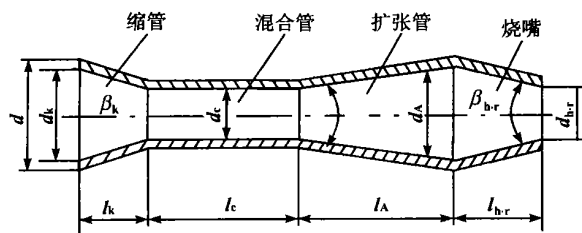


图4 燃烧器的结构

2.4 稳定火焰的方法

由于本设计采用强制鼓风预混式燃烧，气流速度和 Re 数都较大，易产生脱火现象，为此需在燃烧器喷头上加装用锌白铜制作的多孔挡火板，预混的可燃气体流过多孔板时，在相邻两孔之间形成回流区，防止脱火的发生^[3]。在一定燃料及混合比相同条件下，临界状态的吹熄速度 W 与气流压力 P 及回流尺寸成正比，即气流压力增大，吹熄速度也增大，一定气流压力下回流尺寸越大，火焰越不易被吹熄，同时又考虑到点火热负荷，因此挡火板上孔和板的面积比应为 1:1。

3 天然气点火装置在电站锅炉点火中的应用

作者设计的天然气点火装置首次应用在 DG130/39/450—M 电站锅炉上两出力为 0.18 kg/s 煤粉预燃室点火中，并获得了点火上的成功。天然气点火系统见图 5。所得结果列于表 3。

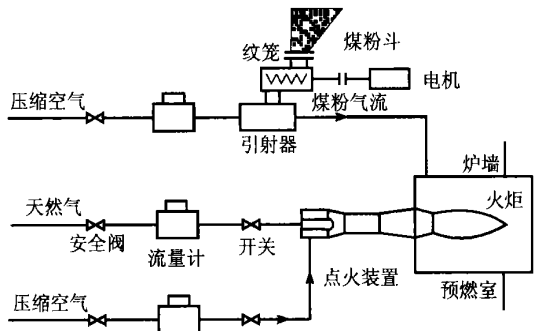


图5 天然气点火系统示意图

表3 天然气点火装置的应用结果

指 标	实 验 次 数						
	1	2	3	4	5	6	7
天然气流量/ $10^{-4}m^3 \cdot s^{-1}$	5.73	8.59	12.90	15.76	17.21	20.07	22.94
空气流量/ $10^{-3}m^3 \cdot s^{-1}$	6.30	9.45	14.19	17.34	18.93	22.08	25.23
空燃比	11	11	11	11	11	11	11
火焰温度/ $^{\circ}C$	1430	1533	1615	1726	1820	1820	1820
火焰长度/m	0.54	0.67	0.76	0.90	1.11	1.11	1.11
煤粉流量/ $kg \cdot s^{-1}$	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
点火时间/s	1265	843	560	458	419	419	419

4 结语

(1) 本装置在给定设计参数下，火炬长达 1.11 m，火焰温度高达 1820 $^{\circ}C$ ，有较强的辐射力，达到了设计的要求，同时也证明了该设计方法的正确性与科学性。

(2) 天然气火焰温度高于柴油燃烧温度，这对各类煤种点火的适应性较强。

(3) 该点火装置在 DG130/39/450—M 电站锅炉的煤粉预燃室中燃烧 7 min 后，煤粉预燃室完全进入稳定运行状态，点火装置可熄灭。这也就是说该点火装置在短短的几分钟内，只需 1.44~2 m³ 天然气就可将煤粉预燃室点燃，折合成本仅 5 元，从经济上来看也是合理的。与传统用油点燃 1 次锅炉需 2 t 柴油(折合人民币 4 000 元)，时间长达 4 h 对比，本装置具有点火可靠，操作方便，应急能力强，经济效益高，污染小等优点，在我国电站锅炉上具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 白尚显, 唐文俊. 燃料手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [2] 张全国, 刘圣勇. 燃烧理论及其应用[M]. 郑州: 河南科技出版社 1993.
- [3] 孙文超. 空气—乙炔枪的研制[J]. 燃烧科学与技术, 1986 6 (5): 35—42
- [4] 徐旭常. 燃烧理论与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [5] 古索夫斯基 B II. 加热炉及热处理炉燃烧装置手册[M]. 张永安译. 北京: 冶金工业出版社 1988.

(渠 源 编 辑)

(上接第 168 页)

- [3] 王飞, 薛飞, 马增益, 等. 运用彩色 CCD 测量火焰温度场的试验研究机误差分析[J]. 热能动力工程, 1998, 13(2): 81—84.
- [4] 张师帅, 周怀春, 黄素逸, 等. 采用辐射能反馈信号的火电单元机组负荷控制系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21

(2): 85—88

- [5] 彭敏, 刘武林. 300 MW 锅炉性能试验报告[R]. 长沙: 湖南中试所 1999.

(渠 源 编 辑)

burning test rig. The measuring and test results are presented. **Key words:** charge-coupled device, temperature measurement, genetic algorithm

基于火焰图像处理的炉膛辐射能信号的检测及分析= **Flame Image Processing-based Detection and Analysis of Furnace Radiation Energy Signals** [刊, 汉] / ZHANG Shi-shuai, ZHOU Huai-chun (Power Engineering Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), PENG Min, LIU Wu-lin (Central Testing Institute under the Hunan Provincial Electric Power Bureau, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 166 ~ 168, 182

An on-site detection test was conducted on a 300 MW coal-fired boiler of Xiangtan Power Plant by the use of a flame image processing-based detection system of furnace radiation-energy signals. In addition, an analysis has been performed on the relationship between the furnace radiation energy signals and the boiler main operating parameters. The results of the analysis indicate that the furnace radiation energy signals can to a certain extent not only forecast the actual output of the boiler, but also reflect the combustion conditions in the boiler. **Key words:** coal-fired boiler, flame image, furnace radiation energy, detection method

六角燃烧锅炉同心双切圆流场的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of the Concentric Double-tangential Circular Flow Field of a Hexagonal-fired Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Yu-xiao, LI Rui-yang, WANG Shi-jun, QIN Yu-kun (Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LU Wei (Thermal Energy Engineering Department, Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 169 ~ 171

By the use of a $k-\epsilon$ dual-equation turbulent flow model and a particle random trajectory model a numerical simulation is conducted of the burner-zone flow field of a boiler, which adopts wall-installed burners. The primary and secondary air jet flow of the upper layer burner has been arranged in the form of a concentric dual-tangential circle. Through an analysis of the variation of flow field characteristics the cause of slag formation on prototype heating surfaces is investigated and a method for resolving the issue sought out. **Key words:** $k-\epsilon$ dual equation turbulent flow model, particle random trajectory model, concentric dual-tangential circle

导热规律服从 $q \propto (\Delta T)^n$ 广义不可逆卡诺热机的最优性能= **Optimal Performance of a Generalized Irreversible Carnot Engine with Heat Conduction Law Subordinate to $Q^{\mu}(DT)^n$** [刊, 汉] / ZHOU Sheng-bing, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (No. 306 Teaching and Research Department under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 172 ~ 175, 179

Taking into account the thermal resistance losses between a working medium and heat source a constant term is used to express heat leakage loss and a constant factor term to express other irreversible items in a cycle plant with the exception of the heat resistance and heat leakage. As a result, set up is an irreversible Carnot engine model. On the basis of another kind of relatively universal heat conduction law, i. e., $Q^{\mu}(DT)^n$ derived is the optimal characteristic relationship between the heat engine power and efficiency. Through detailed numerical calculations an analysis is performed of the effect on the optimal performance of a generalized irreversible heat engine by the heat leakage, internal irreversibility and heat conduction law. **Key words:** finite-time thermodynamics, heat engine, performance optimization

贴体坐标系下求解复杂几何域内的单相流动= **The Solution of a Single-Phase Flow in a Complicated Geomet-**