

单燃烧器火焰数字图像处理与诊断方法研究

华彦平, 于向军, 吕震中, 范小燕

(东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

摘要: 根据煤粉燃烧理论及数字图像处理技术, 提出用“投影火焰锋面存在”、“投影火焰锋面位置的窜动”以及“投影火焰锋面平均梯度值的变化”三个条件来诊断燃烧器火焰的 ON/OFF 状态, 以用于燃烧操作指导和协助 FSSS 进行炉膛安全保护。

关键词: 炉膛安全保护; 火焰检测; 数字图像处理; 火焰锋面

中图分类号: TK223.23; TN911.73 文献标识码: A

1 前言

电站锅炉燃烧管理是整个电站安全、经济运行的关键所在。影响锅炉灭火保护功能失常的因素是多方面的, 而火检方面的原因是其主要原因。火焰检测系统是炉膛安全监控系统的重要组成部分, 火检信号参与整个 FSSS 的逻辑运算, 用以判断炉膛内的火焰情况, 故火检信号的正确与否直接关系到锅炉灭火保护动作是否正确。自美国 Diamond 公司成功研制出全炉膛火焰电视系统以来, 对锅炉燃烧火焰的检测已逐渐采用图像采集和处理的方法。随着研究的深入, 图像处理技术在炉膛燃烧方面的应用领域正向多元化方向发展, 目前主要集中在火焰检测、火焰参数的计算、燃烧状况的诊断、燃烧排放物浓度的计算以及燃烧温度场的计算等方面; 其在炉膛燃烧方面的应用层次也由全炉膛系统向单火嘴系统发展。我们在早期自行开发的全炉膛火检系统的基础上逐步开发出基于单火嘴的火检系统。本文对单燃烧器火焰数字图像进行了基础研究, 提出了一个基于数字图像处理的单燃烧器火焰诊断方法。

2 数字图像技术基础

2.1 图像数字化

在工程应用领域中, 人始终都在接触各种图像, 这些图像在空间位置上是连续分布的; 且某一位置的亮度取值也是连续分布的。图像中一个点的亮度

是该点的空间位置的函数, 即: 亮度值 $G = g(x, y)$, 这个值称为灰度。通常约定, 图像灰度值大表示亮, 反之表示暗。这种图像称为连续图像或模拟图像。

当用计算机对图像进行处理时, 必须把连续图像变换成离散图像, 这一变换过程称为图像数字化, 离散的图像称之为数字图像。图像的数字化的内容包括两方面的内容: 空间位置的离散和数字化(抽样)以及亮度信号的离散和数字化(量化)。

空间抽样就是将二维空间上的连续图像转换为离散的抽样点(即像素)。具体方法是将一幅空间上连续的图像, 在二维空间上分成 $M \times N$ 个网格, 每个网格用一个亮度(及色度)值表示, 每一个网格称为一个像素(Pixel)。

经过抽样输出的信号为一个模拟值, 模拟值的幅度可以在信号变化的连续范围内任意取值, 把这个连续范围划分为 K 个区间, 所有落入同一区间的模拟幅值都用同一电平值表示, 这个电平值称为灰度值, 这一过程即为量化。实现量化的过程通常称为 A/D 转换, 本系统中采用视频卡来实现。量化的精度即颜色深度主要取决于 ADC 的位数。目前图像的颜色深度有 1、4、8、16、24 和 32。若图像的颜色深度为 24, 位图中每个像素有 24 个颜色位, 可包含 $2^{24} = 16777216 = 16\text{M}$ 种不同的颜色, 这种图像称为真彩色图像, 它的每个基色(RGB)分别使用 8 位。在本系统中图像的颜色深度为 24 位。

2.2 数字图像处理

图像处理是指将客观世界中实际存在的物体映射成数字化图像, 然后在计算机上用数学的方法对数字化图像进行处理, 以达到特定的目标, 比如使图像更清晰, 或从图像中提取某些特定的信息等。

数字图像处理, 实际就是对一个二维数组的处理。一幅图像通常使用图像的分辨率和像素深度来描绘, 即用宽(列的像素数)乘高(行像素数)乘像素亮度的位数来描绘。

数字图像处理是现代图像处理的主要方法, 具

有再现性好、精度高、适用面广和灵活性大等优点。常用的图像处理方法有: 中值滤波、图像对比度增强及边缘检测。

3 基于火焰锋面的燃烧诊断

3.1 火焰锋面

通常煤粉气流在炉膛内的燃烧过程是分两个阶段进行的, 即着火阶段和燃烧过程本身。在着火阶段, 煤粉气流与炽热烟气产生强烈混合; 同时煤粉气流又受到炉膛四壁和高温烟气的辐射, 而将悬浮在气流中的煤粉迅速加热, 煤粉着火之前不发出可见光。煤粉气流着火之后就剧烈地燃烧, 此时燃料中挥发份着火燃烧, 同时, 在炉内高温烟气和火焰辐射的共同作用下焦炭得以加热并在挥发份接近燃烧完毕时燃烧, 煤粉燃烧时发出炽热的光。由于这一过程的存在, 在由着火阶段向燃烧阶段过渡时, 火焰图像的灰度级梯度变化明显增大, 可以利用这一特征进行火焰着火锋面的识别。火焰锋面的有无及其位置, 直接与该燃烧器的燃烧状况相关联。此外, 火焰锋面与背景相比较具有较大的闪烁频率, 这也是可以用于对其识别的主要特征。

火焰锋面可通过下面的处理方法得到:

(1) 采用钩子函数和橡皮条的方法, 在整幅图像中选定要处理的局部图像区域(注: 这样可减少运算量), 如图 1-b、图 2-b、图 3 及图 4 所示;

(2) 计算选定区域的灰度值和平均亮度值;

(3) 对选定区域的灰度值进行中值滤波, 以平滑噪声。

中值滤波方法是一种非线性信号处理技术, 对图像中比较孤立的随机脉冲噪声有良好的抑制作用, 而对图像的轮廓边缘得以较好的保护。另外, 中值滤波具有对阶跃信号、斜升信号不产生影响, 滤波后保持频谱不变以及对图像上的椒盐噪声具有很强的去除作用等特性。中值滤波的效果如图 1-c、图

2-c 所示, 很明显, 经过变换后, 图像变得平滑, 过渡明显。

中值滤波的窗口可以是一维的, 也可以是二维的。窗口内像素总数应为奇数。一维形式下的中值滤波器是一个具有奇数个像素点的移动窗口, 将窗口中的像素点按灰度值排序后形成有序数列 $\{P_{i-m}, P_{i-m+1}, \dots, P_i, \dots, P_{i+m}\}$, G_i 为该窗口的滤波输出, 则

$$G_i = \text{Med}\{P_{i-m}, P_{i-m+1}, \dots, P_i, \dots, P_{i+m}\}$$

$\text{Med}\{\dots\}$ 表示取数列中值。由于表面图像是二维的, 因此将一维中值滤波推广到二维形式。选取某种形式的二维窗口, 将窗口像素点按先行后列的顺序排成一维数列后排序形成单调数列 $\{P_{jk}\}$, 运用同样方法, 二维中值滤波的输出 $G(j, k)$ 为: $G(j, k) = \text{Med}\{P_{jk}\}$ 。

滤波窗口的形状非常多, 常用的二维中值滤波窗口有线形、方形、十字形、圆形和菱形等, 不同滤波窗口的滤波效果不同。二维 $N \times N$ 中值滤波比一维 $N \times 1$ 中值滤波更能抑制噪声。方形中值滤波有时会滤除图像轮廓的尖角, 破坏图像的形状。因而, 常常用十字形中值滤波。但由于我们对燃烧器火焰作出燃烧诊断时, 只需处理特定区域的图像, 无须对一帧图像全部分析, 而采用方形中值滤波不会影响特定区域的形状, 因此在本系统中采用方形中值滤波的方法。一般来说, 窗口选大了, 除噪声受到抑制外, 平均化的效果也较强, 但边缘及细节信息易受到损失, 故综合考虑各种因素, 本系统中采用 3×3 的中值滤波。

(4) 锐化处理。着火图像中的不同部位, 特别是着火部位和背景部位, 尽管其差别还可以辨别, 但反差并不大。通过采用灰度变换方法可以很容易地加大图像的反差。着火火焰区域的灰度值一般在 200 左右, 故将位于 $[150, 200]$ 范围内的灰度值变换到 $[10, 235]$ 范围内。公式为:

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{10}{150}f(x, y) & 0 \leq f(x, y) \leq 150 \\ \frac{235-10}{200-150}f(x, y) + 10 - \frac{235-10}{200-150} \times 150 & 150 \leq f(x, y) \leq 200 \\ \frac{256-235}{256-200}f(x, y) + 235 - \frac{256-235}{256-200} \times 200 & 200 \leq f(x, y) \leq 256 \end{cases}$$

如图 1-d、图 2-d 所示, 选定区域的图像的反差增强了。

(5) 计算火焰锋面。在本系统中, 采用 Sobel 算

子的算法对选定区域作处理。方法如下: 将煤粉喷出的方向作为 x 方向, y 方向垂直于 x , 方向由下向上, 由于火焰灰度的突变基本上发生在煤粉的喷出方

向,故在此为简化处理,只根据 x 方向的像素值的变化对选定区域的每行数据进行处理。

$$\Delta g_x(x, y) = g(x-1, y-1) - g(x+1, y-1) + 2 \times g(x-1, y) - 2 \times g(x+1, y) + g(x-1, y+1) - g(x+1, y+1)$$



图 1-a 原始图像

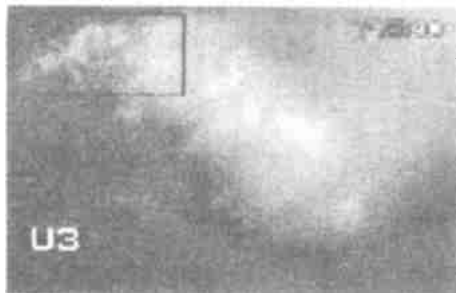


图 1-b 橡皮条矩形图



图 1-c 中值滤波



图 1-d 对比度增强图

处理后得到 x 方向的加权平均差分值 $\Delta g_x(x, y)$, 在同一行上取最大加权平均差分值 $g = \max(\Delta g_x(x, y))$, 如 $g < g_{\min}$ (阈值), 则令 $x = 0$, 即认为此行无锋面点; 如 $g > g_{\min}$, 取同一 g 对应的最小 x 值, 这是指若在同一行中有多个最大值时, 对应的 x 取最小值。按此方法求得每一行的加权平均差分值最大素象点的效果图, 如图 1-e、2-e 所示。

将上面求得的每一行加权平均差分值最大的像素点对应的 x, y 值取平均得 X, Y , 并将点

$G(X, Y)$ 定义为火焰锋面的投影点。其中, X, Y 的定义如下式(i 表示第 i 行):

$$X = \frac{\sum x_i}{n}; Y = \frac{\sum y_i}{n}$$



图 1-e 火焰锋面



图 2-a 原始图像

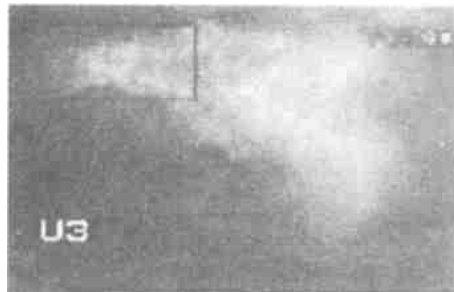


图 2-b 橡皮条矩形图



图 2-c 中值滤波

根据燃烧过程理论, 煤粉气流的着火过程是复杂的, 受燃料本身的性质、风粉浓度、风量、风速参数及锅炉运行负荷等多种因素的影响, 由于燃烧过程很强烈, 给粉和风的不对称性以及高温烟气卷吸不均匀, 着火过程趋向于在不固定的一点首先发生, 有时出现在几点上, 但很难沿射流的周边同时出现。即燃烧过程是脉动的, 火焰锋面的位置 G 也是波动的(在 X 方向或者 Y 方向)。因此, 我们将前后两帧图像的锋面位置 G_1, G_2 作比较, 若

上面求得的投影锋面为真实火焰锋面, 则其在 X 方向或 Y 方向会有一些的变化, 即必须 $|x(G_1) - x(G_2)| \geq \min \Delta x$ 或 $|y(G_1) - y(G_2)| \geq \min \Delta y$, 根据现有的采

集图像的计算统计规律, 阈值 $\min \Delta x$ 和 $\min \Delta y$ 取为 2 个像素点 (实际使用中 $\min \Delta x$ 和 $\min \Delta y$ 的值可用神经网络进行样本训练的方法来确定)。



图 2—d 对比度增强图

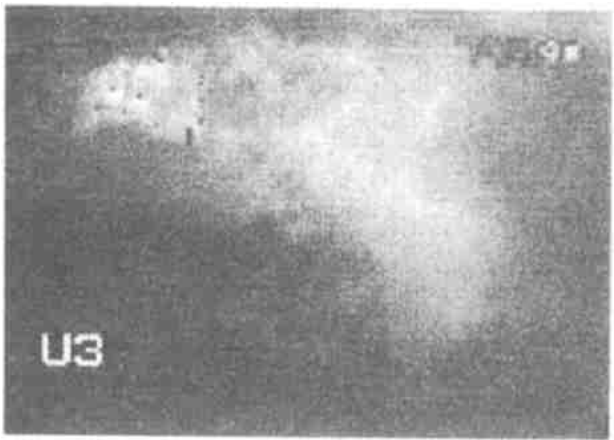


图 2—e 火焰锋面

由于探头的视场角很大以及有时探头的安装位置不当, 容易产生“偷看”现象, 即偷看邻角燃烧器的火焰, 根据理论研究, 偷看的火焰信号脉动特性不及本燃烧器的火焰信号的脉动特性。因此, 为了防止因“偷看”产生的误判, 必须判断投影火焰锋面前后的梯度变化, 即真实锋面在 X 方向的梯度值 Dx 有一定的变化, Dx 定义为:

$$Dx = \frac{\sum g_i}{n}$$

只有当 $|Dx_1 - Dx_2| \geq \min \Delta Dx$, 投影锋面才可能是真实锋面。根据现有的采集图像的计算统计规律, 阈值 $\min \Delta Dx$ 取为 8 (同样, 实际使用中 $\min \Delta Dx$ 的值可使用神经网络进行样本训练的方法确定)。

3.2 燃烧火焰 ON/OFF 判据

3.2.1 单个燃烧器火焰 ON/OFF 的判断

当下面三个条件均满足时, 发出单个燃烧器火焰 ON 信号, 否则, 发 OFF 信号:

(1) 存在投影锋面火焰;

(2) 视频流前后帧的投影锋面火焰的位置在 X 方向或 Y 方向上有一定的变化;

(3) 投影锋面火焰的前后梯度在 X 方向上的变化值大于阈值。

3.2.2 层火焰 ON/OFF 判断

当满足“该层单燃烧器检测到 3/4 为 OFF 信号”这一条件时, 发出该层火焰 OFF 信号。

3.2.3 全炉膛 ON/OFF 的判断

每一燃烧器层未检测到的火焰数都不少于该层燃烧器数的 3/4 时, 认为全炉膛火焰丧失。

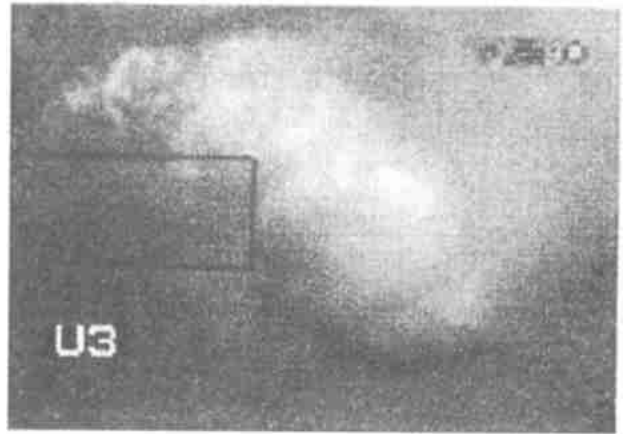


图 3 橡皮条矩形图

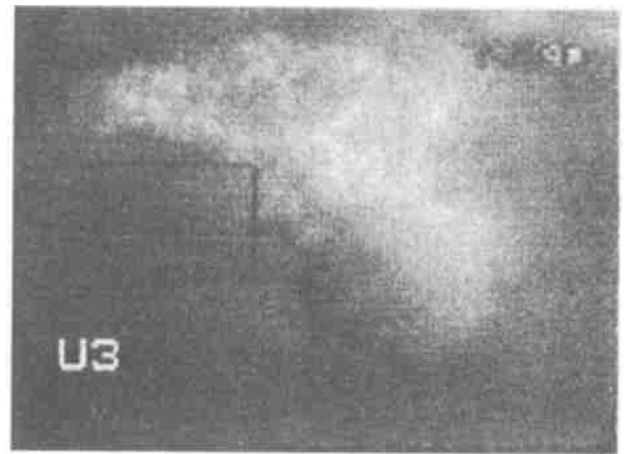


图 4 橡皮条矩形图

3.3 火焰图像 ON/OFF 判断实例

图 1—a、图 2—a 是连续采集的两帧燃烧器火焰图像, 采集间隔时间为 250 毫秒; 首先确定该燃烧器

的燃烧诊断区域,如图1-b、图2-b所示;中值滤波的效果图为图1-c、图2-c;火焰图像对比度增强的效果图分别为图1-d、图2-d;火焰锋面图像如图1-e、图2-e所示。通过加权平均计算,求得前一帧火焰图像燃烧器区域图1-b的投影锋面 $G_1(X, Y)$,其中 $X_1 = 45.2336, Y_1 = 119.550$,投影锋面的平均差分 $D_1 = 81.9429$;后一帧火焰图像燃烧器区域图2-b的投影锋面 $G_2(X, Y)$,其中 $X_2 = 49.7567, Y_2 = 119.902$,投影锋面的平均差分 $D_2 = 63.2857$;前后帧火焰投影锋面的位置变化为 $\Delta X = |X_1 - X_2| = 4.5231 > 2, \Delta Y = |Y_1 - Y_2| = 0.352$,前后梯度的变化为 $\Delta D = |D_1 - D_2| = 18.6572 > 8$,显然该燃烧器选定区域的火焰同时满足单燃烧器火焰ON/OFF判断的三个条件,据此可判断燃烧器火焰为ON。

同样是上面两帧图像1-a、2-a,在上面处理的燃烧器燃烧火焰的下方是另一层燃烧器的燃烧火焰区域,其选定区域如图3和图4;通过计算,求得前一帧火焰图像燃烧器区域火焰投影锋面 $G_3(X, Y)$,其中 $X_3 = 52.4868, Y_3 = 78.3708$,投影锋面的平均差分 $D_3 = 23.8857 > 16$;后一帧火焰图像燃烧器区域火焰的投影锋面 $G_4(X, Y)$,其中 $X_4 = 51.1244, Y_4 = 77.6805$,投影锋面的平均差分 $D_4 = 17.7273 > 16$;前后帧火焰投影锋面的位置变化为 $\Delta X = |X_4 - X_3| = 1.3624 < 2, \Delta Y = |Y_4 - Y_3| = 0.6803 < 2, \Delta D = |D_4 - D_3| = 6.1584 < 8$,根据上面的分析,该燃烧器火焰不满足单个燃烧器火焰ON/OFF判断的条件(2)(3),因此该燃烧器火焰燃烧不正常,系统发出OFF信号。

(上接第64页)

采用离散颗粒气固流动数值模拟方法可对移动颗粒层过滤除尘机理进行探讨研究,并在定性上与实验结果反映出存在共性。在移动颗粒层过滤除尘器中,粉尘颗粒与过滤介质颗粒间的碰撞对除尘起着重要作用,碰撞发生的频次在低风速时较大,随风速提高而下降,当风速达到某一值时,碰撞频次开始明显减少。由数值模拟得到的碰撞频次和实验过程测取的除尘效率与风速变化具有相同变化趋势。

参考文献:

- [1] 许世森. 移动颗粒层过滤高温除尘过程结构和参数优化实验研

4 结论

本文根据煤粉燃烧理论及数字图像处理理论,并结合现场实际情况,提出用“投影火焰锋面存在”、“投影火焰锋面位置的窜动”以及“投影火焰锋面平均梯度值的变化”这三个条件来诊断燃烧器火焰的ON/OFF状态,以用于燃烧操作指导和协助FSSS进行炉膛安全保护,该算法不要求图像特征区满足一定的分布规律,更不用事先确定图像特征区的几何分布,因此算法具有相当的通用性,能处理不同炉型、不同观察角度得到的火焰图像,且简单高效、便于实时运行;另外该算法判据考虑“投影火焰锋面位置的窜动”以及“投影火焰锋面平均梯度值的变化”,克服了图像中火焰背景和周围环境的影响,有很强的抗干扰能力。尽管国外火检系统的研究正在向着提高燃烧效率,降低 NO_x 排放的方向发展,国内研究的首要问题仍然是安全性问题。因此,本系统有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吕震中,沈炯. 电站锅炉火焰检测及燃烧诊断技术[J]. 锅炉技术, 1997(5): 8-13.
 [2] SHIMADA M. Prediction method of unburnt carbon for coal fired utility boiler using image processing technique of combustion flame[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1990, 5(4): 640-645.
 [3] 徐传勇. 数字图像处理技术在火焰上的应用[J]. 中国电力, 1994(10): 41-44.

(辉 编辑)

究[J]. 中国电机工程学报, 1999 19(5): 13-17.

- [2] YUAN ZHULIN. Direct numerical simulation of dense gas-solid two-phase flows[J]. Journal of Developments in Chemical Engineering & Mineral Processing, 2000, 8(3/4): 207-217.
 [3] 袁竹林. 用直接数值模拟方法对流化床内颗粒运动区域的研究[J]. 燃料化学学报, 2000 28(4): 372-375.
 [4] TSUJI Y. Discrete particle simulation of gas-solid flow[J]. KONA, 1993(11): 57-68.
 [5] ELGHOBASHI S E, ABOU-ARAB T W. A two-equation turbulence model for two-phase flows[J]. Phys Fluids, 1983(4): 931-938.

(何静芳 编辑)

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —62~64, 72

With the use of a mathematical model featuring discrete particle movement a preliminary study was conducted of the collision of dust particles in the dust filter of a moving granule bed with filter media particles and its effect on the dust removal efficiency. The variation relationship of the number of times of collision with the system air speed was simulated and calculated. After comparison with the experimental results it has been found that with the change in the system air speed there exists a qualitative agreement between the particle collision frequency and the dust removal efficiency. The study results show that the action of collision between particles plays a major role in influencing the dust removal performance of the moving granule bed. **Key words:** discrete particles, numerical simulation, dust removal by filtration

电站锅炉系统仿真模型计算策略的研究 = **Research on the Calculation Strategy of a Simulation Model for a Utility Boiler System** [刊, 汉] / CHEN Li-jia, MA Guang-fu, WANG Zi-cai (Simulation Center of the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —65~67

The effective solution of a simulation model for a complicated system is related to the problem of how to organize the relevant complex equations of the simulation model and allocate suitable algorithms. First, the authors have identified the difference between the calculation strategy of the equations and the conception of concrete integration algorithms. This is followed by an in-depth exploratory study of two existing kinds of calculation strategy, the module-oriented and the equation-oriented, in respect of its application features as well as its merits and demerits. Also proposed is a scheme of sequential clustered calculation strategy. Finally, through a specific example of the solution for a utility boiler simulation model the superiority of the sequential clustered calculation strategy has been further demonstrated as regards its ability to attain a high-precision simulation for complicated systems. **Key words:** calculation method, equation-oriented approach, module-oriented approach

单燃烧器火焰数字图像处理与诊断方法研究 = **A Study of the Digital Image Processing and Diagnosis Method for a Single Burner Flame** [刊, 汉] / HUA Yan-ping, YU Xiang-jun, LU Zen-zhong, et al (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —68~72

On the basis of pulverized-coal combustion theory and digital image processing technology proposed is a method for the diagnosis of the on/off status of a burner flame. The method features three conditions, namely, the presence of a projection flame front, the irregular shifting motion of the latter's location, the variation of the latter's average gradient value. With the help of the above method it is possible to guide combustion operations and help FSSS (furnace safeguard supervisory system) to ensure furnace safety protection. **Key words:** furnace safety protection, furnace flame detection, digital image processing, flame front

传感器故障检测的 Powell 神经网络方法 = **Sensor Failure Detection Based on a Powell Neural Network Method** [刊, 汉] / LI ming, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —73~75

It is essential for the control system of a large-sized thermodynamic system to detect sensor failures and then take pertinent measures to ensure the successful implementation of the control process. The authors have come up with a new type of failure detection method based on Powell neural network. Under this method a neural network observer is set up for each sensor of the thermodynamic system, which at first received an off-line training. On this basis, failure detection and on-