

# 基于粗糙集理论的火焰图像处理与状态识别

武广富, 吕震中

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 针对全炉膛火焰检测的主要问题, 提出了一种基于粗糙集理论的火焰状态识别方法。该方法利用粗糙集理论的分类原则, 得到火焰燃烧的高温区域, 结合其它火焰图像的特征量, 用基于粗糙集的知识决策系统建立火焰状态识别规则, 构建全炉膛燃烧状态识别的基本模型, 判断燃烧状态。由于决策表的简单属性表达, 有利于操作人员的理解并为调整锅炉燃烧提供操作指导。现场试验表明, 火焰图像的特征量与燃烧的好坏有密切关系。通过属性集的定量分类实现输出量的定性识别, 系统状态识别准确可靠。

**关 键 词:** 粗糙集; 图像处理; 状态识别; 火焰检测; 决策表中图分类号: TK227 文献标识码: A

## 引 言

锅炉燃烧的安全性和高效性对电力生产具有重要意义, 燃烧状态的监测和评价是电站锅炉燃烧优化的必要内容。目前, 火检装置集中于单燃烧器, 由于电极法、声学法、差压法、测温法等自身的缺点而难以得到广泛应用, 使用较广的火检有紫外线、红外线和可见光火检。随着研究的深入, 数字式火检和图像火检有了迅速的发展, 但数字式火检难以适应多变的工况, 无法跟踪因各种因素导致的火焰漂移问题, 图像火检存在的主要问题是火焰特征提取困难, 模糊规则不完善, 图像信息量大, 限制了其广泛应用<sup>[1~3]</sup>。

本文将粗糙集理论引入全炉膛火焰数字图像的识别和判据中, 结合粗糙集约简规则, 可有效改进图像火检的实时性和准确性。

## 1 粗糙集理论<sup>[4]</sup>

粗糙集(Rough Sets)是 20 世纪 80 年代由波兰数学家 Z. Pawlak 提出的一种分析数学理论。粗糙集的意义在于它确定了模糊性与不确定性的关系, 其理论要点是在保持信息系统分类能力不变的情况

下, 充分利用已知信息, 通过知识约简从大量的数据中发现关于某个问题的基本知识或规则。

设一个四元组  $S = \{U, A, V, f\}$  是一个信息系统或知识表达系统, 其中:  $U$ —所讨论对象的非空有限集合,  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;  $A$ —属性的非空有限集合,  $A = C \cup D$  且  $C \cap D = \phi$ ,  $C, D$  为条件属性集和决策属性集;  $V = \bigcup V_a, a \in A, V_a$  为属性  $a$  的值域;  $f: U \times A \rightarrow V$  是一个信息函数, 它为每个对象的每个属性赋予一个信息值, 即  $\forall a \in A, x \in U, f(x, a) \in V_a$ 。

## 2 基于粗糙集的火焰高温区域检测算法

文献[5~6]介绍了区域分割的一般算法, 考虑到燃烧的脉动性比较强烈, 图像噪声较多, 因此选用 Kirsch 算子进行边缘检测。对数字图像的每一个像素考察它的 8 个邻点灰度的变化, 以其中 3 个相邻点的加权减去剩下 5 个邻点的加权和。令 3 个邻点环绕不断移位, 取其差值的最大值作为 Kirsch 算子值。通常 Kirsch 算子由 8 个模板组成。设第  $i$  个模

板的形为  $\begin{bmatrix} A_i & A_{i+1} & A_{i+2} \\ A_{i+7} & 0 & A_{i+3} \\ A_{i+6} & A_{i+5} & A_{i+4} \end{bmatrix}$ , 则图像上某像素

经 8 个模板运算的结果可以表示为:

$$K(x, y) = \max\{1, \max[5S_i - 3T_i]\} \quad i = 0, 1, \dots, 7 \quad (1)$$

其中:  $S_i = f(A_i) + f(A_{i+1}) + f(A_{i+2}), T_i = f(A_{i+3}) + f(A_{i+4}) + f(A_{i+5}) + f(A_{i+6}) + f(A_{i+7})$ 。

对一幅  $M \times N$  个像素组成的火焰图像, 设像素  $x$  为  $U$  中的一个对象, 称知识库  $K = (U, R)$  为一个图像近似空间。为了得到火焰区域, 定义条件属性集  $C = \{c_1, c_2\}$ , 其中:  $c_1$ —像素平均灰度值属性;  $c_2$ —区域轮廓属性。在炉膛燃烧过程中, 高亮区代表高温区, 灰暗区代表低温区, 选择一个灰度值做阈值  $P$ 。定义决策属性  $D = \{0, 1\}$ , 其中: 0—像素点处

于高温区; 1—像素点处于低温区。

根据以上定义, 依据粗糙集的知识分类方法, 结合文献 [5] 火焰目标分割的方法, 对火焰图像进行区域分割。等价关系  $R_{c1}$  定义为: 如果两个像素的灰度值都大于某个阈值  $P$ , 则两个像素是  $R_{c1}$  相关的, 属于等价类, 用公式表示:  $R_{c1}(x) | \{x | f(x) > P\}$ 。  $x$  表示该点的像素;  $f(x)$  表示像素的灰度值;  $R_{c1}(x)$  表示所有“较亮”像素  $x$  组成的集合。等价关系  $R_{c2}$  定义为:  $R_{c2}(x) | \{s_j | \text{int} | m(s_j) - m(s_{i+1j+1}) | > Q\}$ 。  $R_{c2}(s)$  表示边缘像素的集合;  $S_{ij}$  和  $s_{i+1j+1}$  表示相邻的图像子块。令  $A = R_{c1}(x) - R_{c2}(x)$ , 则区域  $A$  就是火焰的高温区域。为了剔出毛刺, 还需要进行图像增强处理, 以减小误差 [7]。

### 3 识别燃烧模式的火焰图像特征量

判断燃烧过程稳定性就是针对不同工况的图像进行模式识别的过程。为了对火焰图像进行准确快速的模式识别, 本文选用 4 个特征量: 火焰平均亮度、火焰区域形状、高温区面积和火焰颜色分量比。

#### 3.1 火焰平均亮度

火焰平均亮度越高, 燃烧状态越好, 否则燃烧状态较差, 可能灭火。

设计算区域内图像为  $C = [c_{ij}]_{m \times n}$ , 其中  $n, m$  为图像在长、宽方向上的像素数, 则火焰平均亮度  $c$  为:

$$c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij}}{mn} \quad (2)$$

#### 3.2 火焰颜色分量比

煤粉着火前后, 炉膛内过量空气系数变化很大, 火焰的颜色也不尽相同。由于炉膛背景辐射的原因, 红色(R)分量强度值在全炉膛图像中基本没有什么变化, 但绿色(G)和蓝色(B)分量的强度值在火焰中心和外围有明显的变化。因此可以选用图像的蓝色分量(或绿色分量)和红色分量比作为煤粉火焰图像识别的一个特征值, 即  $p = G/R$  或  $p = B/R$ , 本文采用前者。

#### 3.3 火焰高温区域的圆形相似度

对于四角切圆燃烧的锅炉来说, 正常均衡燃烧时火焰的中心区域应该呈规则的圆形。若各燃烧器的特性、各喷角的风粉配比不恰当等因素都会影响火焰中心区域形状, 使它成不规则的类圆形。为了量化这种相似性, 我们定义火焰中心区域与圆形的相似度这个概念, 用  $\Phi$  来表示,  $0 < \Phi < 1$ 。

设图像的中心点为  $C$ , 以  $C$  为中心将轮廓分成  $l$  个扇形, 每个扇形近似看成以  $r$  为半径的一段圆弧, 如图 1 所示。相似度用公式表示为:

$$\Phi = \left[ \sum_{i=1}^l \frac{\pi}{n} r_i^2 \right] / \pi R^2 \quad (3)$$

其中:  $R = \max(r_i), i = 1, 2, \dots, l$

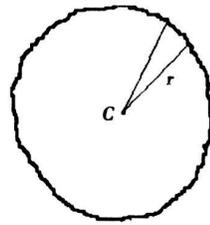


图 1 相似度计算模型

#### 3.4 高温区面积占有率

试验发现, 燃烧越剧烈, 高温区域面积越大, 在图像中的面积占有率也越大。由基于粗糙集的区域检测算法将高温区域从整张图像中分离出来, 即可计算高温区域在图像中面积大小, 用公式表示高温区面积占有率  $h$  为:

$$h = S_{ht} / (m \times n) \quad (4)$$

其中:  $S_{ht}$ —高温区像素数;  $m, n$ —图像在宽度、长度方向上的像素数。

#### 3.5 燃烧状态判据分析

为通过全炉膛火焰数字图像对总体燃烧状况进行评价, 针对高负荷、低负荷和临界灭火时火焰图像特征量存在较大差异, 燃烧状况受很多因素影响和制约, 个别特征量由于干扰会偏离真实值, 因此, 采用多特征量的融合判据来判断燃烧状况更能体现燃烧的特性, 提高火焰检测的准确性。

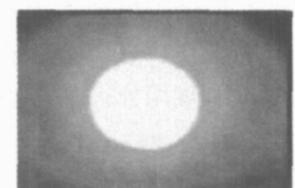
## 4 基于粗糙集和数字图像处理的燃烧状态识别

#### 4.1 火焰特征量的获取

针对某四角切圆燃煤锅炉进行试验研究, 该锅炉采用中间储仓式制粉系统, 3 层燃烧器对称布置。试验记录了 65 组火焰图像作为处理样本, 3 种典型燃烧状态图像如图 2 所示。

图 3 是对样本图像进行特征量提取的结果曲线。在部分状态各特征量的关联度较大, 条件属性域  $C$  中的等价类较多; 而在其它状态, 特征量的关联度较小, 即条件域  $C$  中的等价类较少 [8~9]。

#### 4.2 基于粗糙集决策的约简过程



(a) 稳定燃烧



(b) 临界稳定燃烧



(c) 不稳定燃烧

图 2 各种状态的典型燃烧图像

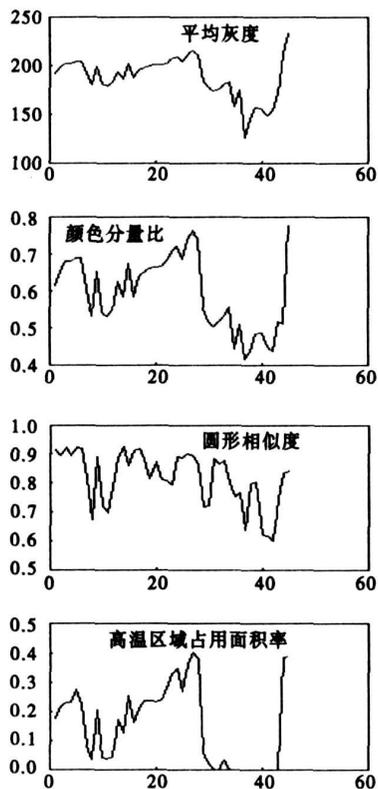


图 3 学习样本特征量

象的一种属性。根据论域  $U$  中对象条件属性的不同,被划分到不同决策属性的决策类。对于分类来说,并不是所有的条件属性都是必要的,去除多余属性不影响分类的结果,这个过程称为约减。

表 1 决策

$U$	$a$	$b$	$c$	$d$
1	1	0	0	0
2	1	2	0	0
3	2	1	1	0
4	2	1	0	2
5	1	2	2	1
6	1	0	2	1

表 2 约减  $\{a, c\}$

$U$	$a$	$c$	$d$
1	1	0	0
3	*	1	0
4	2	*	2
5	*	2	1

表 3 约减  $\{b, c\}$

$U$	$b$	$c$	$d$
1	0	0	0
2	2	0	0
3	*	1	0
4	1	0	2
5	*	2	1

现举例说明约减的过程。表 1 是原始决策表,  $U$  中有 5 个对象, 编号 1~5,  $\{a, b, c\}$  是条件属性,  $d$  是决策属性。对表 1 去除多余属性后, 约减  $\{a, c\}$  和  $\{b, c\}$ , 结果如表 2 和表 3 所示, 它们具有与原决策表相同的分类能力<sup>[10]</sup>。

将学习样本的特征量依据运行工况进行归类, 用数字序列  $\{0, 1, 2\}$  来代表特征量所预示的燃烧特性, 0 代表优良, 1 代表一般, 2 代表较差, 结果如表 4 所示, “√”表示该特征量值对应的相对燃烧状态序列。

把火焰图像作为论域的对象, 特征量作为条件属性, 火焰的燃烧状态识别结果作为决策属性, 决策属性定义为  $\{0, 1, 2\}$ , 含义同上。将多组稳态下特征量的均方差的平均值作为阈值  $\sigma_0$ , 计算特征量连续 5 个瞬时值的均方差, 当计算结果大于  $\sigma_0$  时, 该属

性不能约简, 否则, 约简该条件属性, 利用约简后属性判断燃烧状态。需要说明的是不同的特征量, 其阈值也不相同, 并且需要多次试验得到, 并适时加以修正。

表 4 特征量归类

特征量	取值范围	条件状态		
		0	1	2
平均亮度 $c$ (灰度值)	$c \geq 200$	✓		
	$180 < c < 200$		✓	
	$c \leq 180$			✓
相似度 $\Phi$	$\Phi \geq 0.9$	✓		
	$0.8 < \Phi < 0.9$		✓	
	$\Phi \leq 0.8$			✓
颜色分量比 $p$	$p \geq 0.65$	✓		
	$0.55 < p < 0.65$		✓	
	$p \leq 0.55$			✓
高温区域占 用面积率 $h$	$h \geq 0.20$	✓		
	$0.05 < h < 0.20$		✓	
	$h \leq 0.05$			✓

表 5 原始数据

序列 $U$	条件属性 $C$				输出量 $DT$
	$c$	$\Phi$	$p$	$h$	
1	198.24	0.893	0.653	0.2143	0
2	202	0.895	0.68	0.2279	0
3	180.28	0.722	0.541	0.0385	2
4	178.17	0.695	0.531	0.0355	2
5	180.21	0.876	0.532	0.0333	2
6	192.2	0.816	0.603	0.0809	1
7	156.27	0.803	0.484	0	2

运用上述约简算法对样本图像决策过程进行约简, 决策过程如表 5~8 所示, 输出量  $DT$  代表状态输出。第一步, 选取条件属性的一组数据, 分别计算均方差  $\sigma$ , 与  $\sigma_0$  比较后, 保留其作为条件属性, 构建原始数据表 5; 第二步, 根据表 4 特征量归类方法对条件属性  $C$  进行特征量离散化, 如表 6 所示; 第三步, 分别约简  $\{c, \Phi\}$  和  $\{p, h\}$ , 得到约简属性表 7 和表 8。比较两表, 得到如下规则: IF  $c=0$  THEN  $DT=0$ ; IF  $c=2$  THEN  $DT=2$ ; 如果  $c=1$ , 继续考察  $\Phi$ , 如果  $\Phi=2$ , 则  $DT=2$ , 否则, 继续考察  $p$  和  $h$ , 如果  $p=2$  或  $h=2$ ,  $DT=2$ , 否则  $DT=1$ 。

表 6 原始决策

$U$	$c$	$\Phi$	$p$	$h$	$DT$
1	1	1	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	1	2	2	2	2
4	2	2	2	2	2
5	1	1	2	2	2
6	1	1	1	1	1
7	2	1	2	2	2

表 7 约简  $\{c, \Phi\}$

$U$	$c$	$\Phi$	$DT$
1	1	1	0
2	0	1	0
3	1	2	2
4	2	*	2
5	1	1	2
6	1	1	1

表 8 约简  $\{p, h\}$

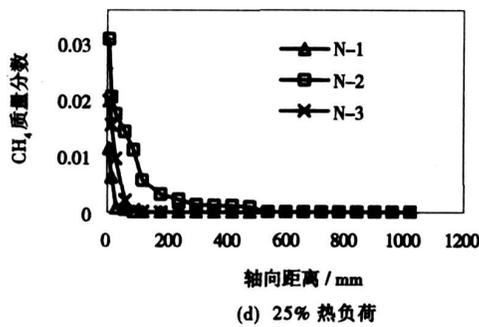
$U$	$p$	$h$	$DT$
1	0	0	0
3	2	2	2
6	1	1	1

以此约束过程对 20 组测试样本 (7 组稳定燃烧样本, 8 组临界稳定燃烧样本, 5 组不稳定燃烧样本) 进行检测, 识别结果为 6 组稳定、9 组临界稳定、5 组不稳定, 正确率 95%, 满足工业现场应用要求。作者将该方法应用于全炉膛监测系统, 图像采集卡以 25 帧/s 速度采集图像, 每次识别过程计算 5 帧图像的特征量, 运用粗糙集识别规则得到即时燃烧状态, 可得到 1 s 内 5 次燃烧状态报告, 状态结果存入历史数据库。考察连续 5 次的状态信号, 经逻辑运算后输出最终状态信号至操作员站。

## 5 结 论

提出了一种新的基于粗糙集的炉膛状态检测方法, 通过对火焰图像的区域检测和特征量提取, 由粗糙集的知识表达, 识别出火焰的燃烧状态。分析表明: 通过粗糙集的约减, 能简化计算量, 提高反应速度, 具有重要的实际工程意义。

(下转第 321 页)

图6 CH<sub>4</sub>质量分数分布

荷的降低,3种燃烧器出口CH<sub>4</sub>质量分数均呈下降趋势。在50%~100%热负荷范围内,N-1、N-3燃烧器出口CH<sub>4</sub>质量分数均小于 $10^{-9}$ ,N-2燃烧器小于 $2 \times 10^{-4}$ ;N-1燃烧器出口CH<sub>4</sub>质量分数相对最低,并且CH<sub>4</sub>质量分数下降最快;N-2燃烧器起点、出口的CH<sub>4</sub>质量分数值都高于N-1、N-3燃烧器,CH<sub>4</sub>质量分数下降也最慢,说明N-2燃烧器燃尽距离最长,燃烧效率相对较低。25%热负荷时,N-1和N-3燃烧器出口CH<sub>4</sub>质量分数下降到 $1 \times 10^{-14}$ 和 $2.97 \times 10^{-11}$ ,而N-2燃烧器出口CH<sub>4</sub>质量分数下降到 $3.6 \times 10^{-15}$ ,燃烧效率相对最高。燃烧效率由下式计算:

$$\eta = \frac{CH_{4i} - CH_{4o}}{CH_{4i}} \times 100\%$$

式中CH<sub>4i</sub>和CH<sub>4o</sub>分别是燃烧器进口CH<sub>4</sub>质量和出口烟气中的CH<sub>4</sub>质量。统计计算可得:50%~100%热负荷范围内,N-1、N-2和N-3燃烧器的燃烧效率分别是99.99%,99.8%和99.99%;25%热负荷时,3种燃烧器的燃烧效率都达到99.99%。

(上接第313页)

#### 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,1997,5:8-14
- [2] 华彦平,吕震中,邹煜.基于图像灰度复杂性测度的炉膛燃烧状况评价[J].动力工程,2002,22(1):1611-1614.
- [3] 刘禾,程伟良.基于火焰序列图像的煤粉燃烧稳定性判别[J].动力工程,2004,24(5):681-684.
- [4] PAWLAK Z. Rough sets and intelligent data analysis[J]. Information Science, 2002, 11(147): 1-12.
- [5] 范华忠,张伯虎,冯艳.数字图像处理技术在火焰目标提取中的应用[J].光电与控制,2006,1:99-102

#### 4 结论

(1) 燃烧器在4:1负荷调节比范围内能稳定着火燃烧,燃烧效率达到99.8%以上。

(2) 在50%~100%热负荷范围内,渐扩喷口燃烧器的中心、外回流区逆向速度大,燃烧高温区域比例大,燃烧效率高,燃尽距离短。

(3) 渐缩喷口燃烧器燃烧温度最高,低负荷时中心、外回流区逆向速度大,燃烧效率高。

(4) 渐缩喷口燃烧器射流刚性好,渐扩喷口燃烧器射流衰减最快。

#### 参考文献:

- [1] 刘文革,余小素.我国煤矿区煤层气发电技术及潜力分析[J].中国电力,2004,38(4):17-20.
- [2] 李超.新型低压低热值煤气燃烧器的研制[J].工业炉,2002,24(4):24-26.
- [3] 章诚,叶桃红,陈义良,等.三维加力燃烧室湍流燃烧的数值模拟[J].中国科学技术大学学报,2000,30(3):325-328
- [4] 赵坚行.燃烧的数值模拟[M].北京:科学出版社,2002
- [5] 岑可法,樊建人.工程气固多相流动的理论及计算[M].杭州:浙江大学出版社,1990
- [6] LESCHZINER M A, RODI W. Computation of strongly swirling axisymmetric free jets[J]. AIAA Journal, 1984, 22(12): 1742-1747.
- [7] SLOAN D G, SMITH P J, SMOOT L D. Modeling of swirl in turbulent flow systems[J]. Prog Energy Combust Sci, 1986, 12: 163-247.
- [8] KOUTMOS P, MCQUIRK J J. Isothermal modelling of gas turbine combustor computational study[J]. Journal of Propulsion, 1991, 7: 1064-1071
- [9] 帕坦卡S V. 传热与流动的数值计算[M].北京:科学出版社,1984.
- [10] 倪建民,陈云,樊建人,等.旋流燃烧器出口湍流流场的数值模拟[J].动力工程,2004,24(1):102-105

(编辑 渠源)

- [6] 朱光忠.边缘检测算子在汽车牌照区域检测中的应用[J].计算机技术与发展,2006,3:161-163.
- [7] 徐立忠.基于粗糙集理论的图像增强方法[J].仪器仪表学报,2000,10:514-516.
- [8] CHIMENTI M, NATALI DI C. An IR image processing approach for characterizing combustion instability[J]. Infrared Physics & Technology, 2004, 46: 41-47
- [9] LU GANG, YAN YONG, RILEY GEN Y, et al. Concurrent measurement of temperature and soot concentration of pulverized coal flame[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 990-995.
- [10] 杨苹,吴捷.火电厂锅炉常见故障的数据挖掘诊断方法[J].仪器仪表学报,2005,7:696-701

(编辑 渠源)

law of mechanical atomizing nozzles. But when the oil spray pressure is relatively low, the atomization mechanism will take a reverse course, i. e. the lower the oil spray pressure, the finer the atomized particles. From the foregoing it can be shown that the swirling steam-based mechanical atomized-oil sprayer can maximally improve the atomization quality under a low-load operating condition and has a relatively large turndown ratio with a steam consumption rate lower than that of an often-used pneumatic atomized-oil sprayer. **Key words:** supercharged boiler, oil sprayer, atomization characteristics, numerical simulation

基于粗糙集理论的火焰图像处理与状态识别 = **Flame Image Processing and Status Discrimination Based on Rough Sets Theory** [刊, 汉] / WU Guang-fu, LU Zhen-zhong (College of Energy Source and Environment under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 310 ~ 313, 321

A flame status discrimination method based on rough sets theory has been presented in the light of the main problems concerning the flame detection of an entire furnace. The method makes use of the classification principle in the rough sets theory to identify the high temperature zone of flame combustion. In combination with other flame image characteristic values, a knowledge decision-making system was employed based on the rough sets theory to set up flame-status discrimination rules and establish a basic model for the discrimination of entire furnace combustion status to make a judgement of the latter. As the decision-making table is of a simple attribute expression, it lends itself to be easily understood by operators and provides operation guidance for boiler combustion regulation. The on-site tests indicate that the characteristic magnitudes of flame images have a close bearing on the quality of combustion process. The processing based on the rough sets theory can lead to a higher effectiveness and the quantitative classification by adopting attribute sets should help realize a qualitative discrimination of the output values, thus resulting in a precise and reliable discrimination of the system status. **Key words:** rough set, image processing, status discrimination, flame detection, decision-making table

基于混沌理论的 PID 参数自整定锅炉汽包水位控制系统设计 = **Design of a Water Level Control System for the Drum of a PID Parameter and Self-tuning Boiler Based on Chaotic Theory** [刊, 汉] / LU Ning, JI Qiu-yun, XIA Zeng-gang (College of automation under the Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 314 ~ 316

The water level in a boiler drum is an important index for the safe and steady operation of an industrial steam boiler. Nowadays, for the water level control usually adopted are feed-forward cascade three-impulse controllers. The control effectiveness is heavily dependent on the proper selection of PID (proportional-integral-differential) parameters of the controller. However, the commonly used parameter-adjusting method involves complicated and tedious steps, resulting in a relatively low searching efficiency. Furthermore, the method is not always an optimized one and big oscillations and overshoots often occur to the control system. By making use of the ergodicity specific to the chaotic theory, one can improve the chaotic-searching optimization method based on Logistic mapping. Presented was a new chaotic PID-parameter optimization method by using one-dimensional iterative chaotic self-mapping which features infinite collapses in a finite region. The simulation results obtained by using the boiler drum models show that the relevant algorithm has a relatively high searching efficiency and accuracy, capable of realizing an optimized adjustment of PID parameters. **Key words:** drum water level, chaos, optimization, PID control

低热值煤层气燃烧器的数值模拟 = **A Numerical Simulation of a Low-heat-value Coal-bed Gas Burner** [刊, 汉] / LUO Yu-dong, ZHANG Li, TANG Qiang, et al (College of Power Engineering under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). —