

粗糙集理论在火焰图像处理及状态识别中应用

武广富, 吕震中

(东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 粗糙集理论能够在保持系统分类不变的基础上, 发现系统内的基本知识。利用 Kirsch 算子进行图像预处理, 依据粗糙集的分类原理将火焰图像的高低温区域分离开来, 建立特征量提取的初始模型。根据对燃烧特性的分析确定了 4 个特征变量作为诊断的依据, 根据全炉膛火焰图像的特点确定特征量的计算模型, 为便于比较研究, 对每个特征量均作离散化处理。由于单个特征量只能部分反映燃烧状态, 同时, 为克服单变量控制的抗干扰性能差、错误率较高的缺点, 按照粗糙集的约简原则, 在比较均方差 σ 基础上选用不同的特征量组合作为判断燃烧状态的参数, 构建基于粗糙集约简的多变量融合的状态识别规则。实验表明, 采用粗糙集方法可以有效地提高处理速度。

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: TK 227

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0084-04

0 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, 电极法、声学法、差压法、测温法等由于自身的缺点而难以得到广泛应用。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^[1-3]。

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

1 粗糙集理论^[4]

粗糙集(rough sets)是一种分析数学理论。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 是所讨论对象的非空有限集合, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; A 为属性的非空有限集合, $A = C \cup D$ 且 $C \cap D = \emptyset$, C, D 分别称为条件属性集和决策属性集; $V \subseteq V_a, V_a$ 为属性 a 的值域, $a \in A$; $f: U \times A \rightarrow V$ 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 $\forall a \in A, x \in U, f(x, a) \in V_a$ 。

粗糙集理论作为一种新的软计算方法用于图像处理, 利用软计算方法所允许的不确定性、不精确性和部分真实性, 得到了易于处理、鲁棒性好和成本较低的解决方法, 是具有发展潜力的智能信息处理方法。

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。对数字图像的每个像素考察它的 8 个邻点灰度的变化, 以其中的 3 个相邻点的加权减去剩下 5 个邻点的加权和。令 3 个相邻点环绕不断移位, 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:

$$\begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$$

设第 i 个模板的形式为

$$\begin{bmatrix} A_i & A_{i+1} & A_{i+2} \\ A_{i+7} & 0 & A_{i+3} \\ A_{i+6} & A_{i+5} & A_{i+4} \end{bmatrix}$$

则图像上某像素经 8 个模板运算的结果可以表示为

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

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 (m, n 分别为图像在宽度、长度方向上的像素数), 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。粗糙集理论中有 2 种属性: 条件属性和决策属性。为了得到火焰区域, 定义条件属性集 $C = \{c_1, c_2\}$, 其中, c_1 是像素平均灰度值属性, c_2 是区域轮廓属性。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 。灰度值属性 $c_1 = \{0, 1\}$, 其中 0 代表 $0 \sim P$, 1 代表 $(P+1) \sim 255$; 区域轮廓属性 $c_2 = \{0, 1\}$, 其中, 0 代表区域 2×2 像素块的平均灰度值与相邻子块的平均灰度值之差的绝对值小于阈值 Q , 1 代表子块的差值绝对值均大于阈值 Q 。定义决策属性 $D = \{0, 1\}$, 其中, 0 代表像素点处于高温区, 1 代表像素点处于低温区。

根据以上定义, 依据粗糙集的知识分类, 结合文献[5]对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_{c_1} 定义为: 如果 2 个像素的灰度值都大于某个阈值 P , 则 2 个像素是 R_{c_1} 相关的, 属于等价类, 用公式表示为

$$R_{c_1}(x) \mid \{x \mid f(x) > P\}$$

式中 x 表示该点的像素; $f(x)$ 表示像素的灰度值; $R_{c_1}(x)$ 表示所有“较亮”像素 x 组成的集合。

等价关系 R_{c_2} 定义为

$$R_{c_2}(x) \mid \{s_{ij} \mid \text{int} |K(s_{ij}) - K(s_{i\pm 1, j\pm 1})| > Q\}$$

式中 $R_{c_2}(x)$ 表示边缘像素的集合; $K(x)$ 为区域像素的平均灰度值函数; s_{ij} 和 $s_{i\pm 1, j\pm 1}$ 表示相邻的图像子块。

令 $A = R_{c_1}(x) - R_{c_2}(x)$, 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[8]。为了对火焰图像进行准确快速的模式识别, 选用 4 个特征量: 火焰平均亮度 (f_{avg})、火焰高温区域的圆形相似度 (λ)、火焰颜色分量比 (z) 和高温区面积占有率 (h)。

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 $F = [f_{ij}]_{m \times n}$, 则火焰平均亮度 f_{avg} 为

$$f_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij} / (mn) \quad (2)$$

式中 g_{ij} 代表像素点的灰度值。

3.2 火焰高温区域的圆形相似度

对于四角切圆燃烧的锅炉而言, 火焰燃烧的中心区域是否呈规则的圆形是电站锅炉操作人员判断锅炉是否均衡燃烧的主要依据。正常均衡燃烧时火

焰的中心区域应该呈规则的圆形, 若各燃烧器的特性和给粉量差异较大, 各喷角的一二三风量及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[9]。因此, 火焰中心区域与圆形的相似度也反映了燃烧状况。为量化这种相似性, 定义了火焰中心区域与圆形的相似度, 用 λ 表示 ($0 < \lambda < 1$), λ 越大, 表明火焰均衡燃烧程度越高, 燃烧状态越理想。

设图像的中心点为 O , 以 O 为中心将轮廓分成 l 个扇形, 每个扇形近似看成以 r_i 为半径的一段圆弧, 示意图如图 1 所示。 l 越大, 计算越精确, λ 可信度越高, 但计算量越多。相似度可用轮廓区域面积和该轮廓的最大半径对应的圆面积之比来计算, 用公式表示为

$$\lambda = \sum_{i=1}^l \frac{\pi r_i^2}{l} / (\pi R_{\text{max}}^2) \quad (3)$$

式中 $R_{\text{max}} = \max(r_i)$ 。

3.3 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。根据实验观察, 煤粉火焰在负荷较高、风煤比合适、燃烧操作良好的情况下呈现明亮的橙黄色; 相反, 在负荷较低、燃烧状况不佳的情况下略显蓝色。

由于炉膛背景辐射的原因, 红色分量 (R_e) 强度值在全炉膛图像中基本没有什么变化, 但绿色分量 (G_r) 和蓝色分量 (B_L) 的强度值在火焰中心和外围有明显的变化。因此, 可以选用图像的绿色分量 (或蓝色分量) 和红色分量比作为煤粉火焰图像识别的一个特征值, 即 $z = G_r / R_e$ 或 $z = B_L / R_e$, 这里采用前者。

3.4 高温区面积占有率

研究发现, 负荷较高、燃烧稳定时, 彩色火焰图像中间呈现不同于边缘的乳白色, 习惯上称该区域为火焰高温区, 燃烧越剧烈, 该区域面积越大, 在图像中的面积占有率也越大[10]。

由于火焰的实际截面积难以直接测算, 因此用获得图像的投影面积来间接表示。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。每个像素在图像中占据的面积大致相当, 通过高温区面积占有率 h 表征燃烧程度, 用公式表示为

$$h = S_{\text{ht}} / (mn) \quad (4)$$

式中 S_{ht} 表示高温区像素数。

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, 燃烧状况受多种因素影响和制约[11], 个别特征量会受到干扰而偏离真实值。因

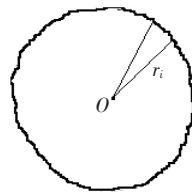


图1 相似度计算模型
Fig.1 Model for similitude calculation

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

在对火焰图像区域检测的基础上,进行像素处理与计算,获得被处理火焰图像的特征量:火焰平均亮度、火焰轮廓的圆形度、高温区域面积占有率和火焰颜色分量比。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。实验记录了 65 组火焰图像作为处理样本。

图 2 是对样本图像作特征量提取的结果曲线,图中 t 为序列。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;而在其他状态,特征量的关联度较小,即条件域 C 中的等价类较少^[12-14]。

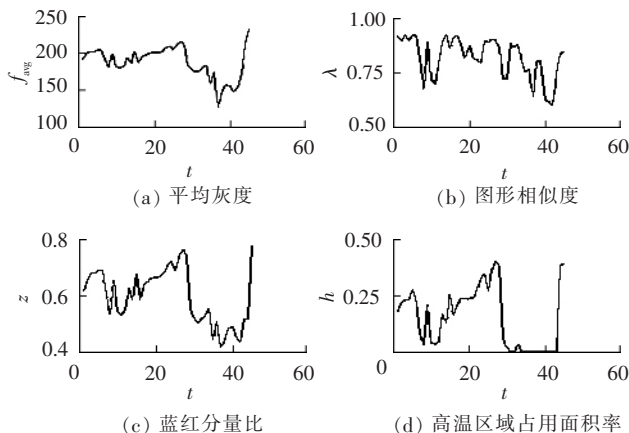


图 2 学习样本特征量提取

Fig.2 Characteristics extraction from samples

4.2 基于粗糙集决策的约简过程

粗糙集理论中用一张二维决策表描述论域 U 中的对象,其中每行描述一个对象,每列描述对象的一种属性。根据论域 U 中对象的条件属性的不同,被划分到不同决策属性的决策类。对于分类,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,这个过程称为约简。

现举例说明约简过程。见表 1~3。表 1 是原始决策表, U 中有 6 个对象,编号 1~6, $\{a,b,c\}$ 是条件属性, d 是决策属性。对表 1 去除多余属性后,约简 $\{a,c\}$ 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^[15]。

将学习样本的特征量依据运行工况进行归类,用数字序列 $\{0,1,2\}$ 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。

表 4 特征量归类

Tab.4 Classification of characteristics

特征量	取值范围	条件状态		
		0	1	2
平均亮度 f_{avg} (灰度值)	$f_{avg} \geq 200$	√		
	$180 < f_{avg} < 200$		√	
	$f_{avg} \leq 180$			√
相似度 λ	$\lambda \geq 0.9$	√		
	$0.8 < \lambda < 0.9$		√	
	$\lambda \leq 0.8$			√
蓝红分量比 z	$z \geq 0.65$	√		
	$0.55 < z < 0.65$		√	
	$z \leq 0.55$			√
高温区域占 用面积率 h	$h \geq 0.20$	√		
	$0.05 < h < 0.20$		√	
	$h \leq 0.05$			√

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 $\{0,1,2\}$ (定义同上)。将多组稳态下特征量的均方差的平均值作为阈值 σ_0 ,计算特征量连续 5 个瞬时值的均方差,当计算结果大于 σ_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,并且需要经过多次的试验得到,并适时加以修正。

运用上述约简算法对样本图像决策过程约简,决策过程如表 5~8 所示,输出量 ε 代表状态输出。

第 1 步 选取条件属性的一组数据,分别计算均方差 σ ,与 σ_0 比较后,保留其作为条件属性,构建

表 5 原始数据表

Tab.5 Original data table

序列 U	条件属性 C				输出量 ε
	f_{avg}	λ	z	h	
1	198.24	0.893	0.653	0.2143	0
2	202	0.895	0.680	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

表 6 原始决策表

Tab.6 Original decision-making table

序列 U	条件属性 C				输出量 ε
	f_{mg}	λ	z	h	
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 1 决策表

Tab.1 Decision-making table

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 约简 $\{a,c\}$

Tab.2 Reduced $\{a,c\}$

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

表 3 约简 $\{b,c\}$

Tab.3 Reduced $\{b,c\}$

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

原始数据表 5;

第 2 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 3 步 分别约简 $\{f_{avg}, \lambda\}$ 和 $\{z, h\}$, 得到约简属性表 7 和表 8。

比较两表,得到如下规则:

IF $f_{avg}=0$ THEN $\varepsilon=0$;
IF $f_{avg}=2$ THEN $\varepsilon=2$;
如果 $f_{avg}=1$,继续考察 λ ,如果 $\lambda=2$,则 $\varepsilon=2$,否则,继续考察 z 和 h ,如果 $z=2$ 或 $h=2$, $\varepsilon=2$,否则 $\varepsilon=1$ 。

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。

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,由图像判断火焰状态能反映当前燃烧的主要特性,给出炉内的燃烧诊断及操作指导,为全炉膛火焰检测提供了新的途径。通过粗糙集的约简,能简化计算量,提高反应速度,具有重要的实际工程意义。

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.
LÜ Zhen - zhong, SHEN Jiong. Flame detection and combustion diagnosis technology of boiler[J]. Boiler Technology, 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.
HUA Yan - ping, LÜ Zhen - zhong, ZOU Yu. The evaluation to boiler combustion based on complexity of image gray time serial [J]. Power Engineering, 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.
LIU He, CHENG Wei-liang. Judging of pulverized coal combustion stability on serial flame images[J]. Power Engineering, 2004, 24(5): 681 - 684.

[4] PAWLAK Z. Rough sets and intelligent data analysis[J]. Information Science, 2002, 11(14): 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]. 电光与控制,2006,13(1):99-102.
FAN Hua - zhong, ZHANG Bo - hu, FENG Yan. A pick-up algorithm of flame object in fire identification system [J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(1): 99 - 102.

[6] 朱光忠,黄云龙,余世明. 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.
ZHU Guang - zhong, HUANG Yun - long, YU Shi - ming. Appli-

cation of edge detection operators in region detection of auto-mobile license plate[J]. Computer Technology and Development, 2006(3):161-163.

[7] 徐立中,王慧斌,杨锦堂. 基于粗糙集理论的图像增强方法[J]. 仪器仪表学报,2000,21(5):514-516.
XU Li - zhong, WANG Hui - bin, YANG Jin - tang. An image enhancing method based on rough sets[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(5): 514 - 516.

[8] 张师帅,周怀春. 基于炉膛辐射能信号的电站燃煤机组燃烧优化算法研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):156-160.
ZHANG Shi - shuai, ZHOU Huai - chun. A study of combustion control of a coal-fired power generation unit based on furnace radiant energy signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 156 - 160.

[9] 周乃君,夏小霞,欧育辉,等. 基于风粉监测的四角燃烧煤粉炉内温度场的动态仿真模型研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):224-227.
ZHOU Nai - jun, XIA Xiao - xia, OU Yu - hui, et al. A method of dynamic simulation for temperature profile in a four-corner fired boiler based on on - line monitoring of air and coal [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 224 - 227.

[10] 黄群星,马增益,严建华,等. 300 MWe 电厂锅炉炉膛截面温度场中心的实时监测研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):156-160.
HUANG Qun - xing, MA Zeng - yi, YAN Jian - hua, et al. On - line monitor for cross - section temperature - field center of 300 MWe furnace[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 156 - 160.

[11] 蔡小舒,季琨,苏明旭,等. 基于光谱分析的煤粉火焰负荷判据和燃烧诊断研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(1):211-215.
CAI Xiao - shu, JI Kun, SU Ming - xu, et al. The study of pulverized coal combustion diagnosis and flame criterion based on the spectrum analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 211 - 215.

[12] YAN Y, LU G, COLECHIN M. Monitoring and characterization of pulverized coal flames using digital imaging techniques[J]. Fuel, 2002, 81(7): 647 - 656.

[13] CHIMENTI M, NATALI C D. An IR image processing approach for characterizing combustion instability[J]. Infrared Physics & Technology, 2004, 46(6): 41 - 47.

[14] CHEN Thou - ho, WU Ping - hsueh, CHIOU Yung - chuen. An early fire - detection method based on image processing[C]// 2004 International Conference on Image Processing. Kaohsiung: IEEE, 2004: 1707 - 1710.

[15] 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,2005,26(7):696-701.
YANG Ping, WU Jie. Fault diagnosis for boilers in thermal power plant by data mining[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(7): 696 - 701.

[16] 束洪春,孙向飞,司大军. 基于粗糙集理论的配电网故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):73-77.
SHU Hong - chun, SUN Xiang - fei, SI Dai - jun. A study of fault diagnosis in distribution line based on rough set theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 73 - 77.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

武广富(1984-),男,安徽巢湖人,硕士研究生,研究方向为热工智能监测和数字图像处理(E-mail:wgftop@163.com);
吕震中(1940-),男,教授,江苏无锡人,博士研究生导师,从事热工测量和炉膛火焰监测方面的研究(E-mail:seulzz@163.com)。

Application of rough sets theory in flame image processing and state recognition

WU Guang-fu, LU Zhen-zhong

(College of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Rough sets theory can discover the basic knowledge without changing system classification. After pre-processing with Kirsch arithmetic operator, the flame image is divided into two areas of high and low temperatures by classification means of rough sets theory in order to build the model for characteristics extraction. Four characteristic variables are taken as diagnostic criteria according to combustion analysis, and their calculation models are determined based on image identity. Each variable is discretized for easy comparison. As single variable can only partially reflect the combustion state, as well as its poor anti-jamming ability and higher state recognition error ratio, different combinations of characteristic variables are taken as combustion diagnostic criteria based on the comparison of mean quadratic error according to the reduction rules of rough sets theory. The experiment shows that the method based on rough sets theory enhances processing speed effectively.

Key words: rough sets; image processing; state recognition; flame detection; decision-making table