

# 通过转炉炉口火焰纹理分析 判断氧气顶吹转炉吹炼终点

尤佳 王绍纯 李希胜 韩艺萍

北京科技大学信息工程学院, 北京 100083

**摘要** 提出了一种通过对转炉炉口火焰纹理特征的分析, 判断氧气顶吹转炉吹炼终点的方法和检测识别系统技术方案. 主要工作包括火焰图像的采集, 图像的预处理, 纹理特征的提取与选择及特征参数的分析比较; 同时编制了应用程序. 实验结果表明, 该方案避免了复杂机理建模的困难, 对转炉炉口的大小没有要求, 在费用上相对较为节省, 适合中小转炉使用.

**关键词** 转炉炼钢; 火焰; 数字图像处理; 纹理分析

**分类号** TP391.41 **文献标识码:** A

在转炉炼钢中, 炉口火焰是熔池温度状况的标志, 而炉口火焰的长短和强弱以及炉口火花多少是钢水含碳量的一个重要判断依据<sup>[1]</sup>.

因此, 通过对转炉炉口火焰图像的处理、研究, 可以监测其冶炼过程. 基于此点, 本文采用了一条新的技术路线——即利用红外技术、计算机视觉和数字图像处理技术, 避开复杂机理建模的困难, 把生产过程视为一个“黑箱”系统, 直接研究系统的输出量, 通过对转炉炉口火焰图像纹理特征的提取与选择, 得出一组特征变量, 再运用图像处理的方法, 研究分析特征变量与吹炼终点之间的对应关系, 最终对系统的状态作出实时在线的判断.

## 1 原始图像的摄取和预处理

火焰图像的摄取是通过架在转炉前的加有高温和防尘保护的 CCD 摄像头, 实时地将转炉炉口火焰的图像采集进计算机; 在计算机中通过图像采集卡, 把输入的视频信号, 经模/数转换器、比例缩放、裁剪等处理, 通过 PCI 总线传到 VGA 实时显示或传到计算机内存实时存储. 利用图像采集卡自带的库函数编制了程序, 可随时抓取一幅图像存为图像文件并进行处理. 在实验室, 原始图像的采集是使用照相机在现场拍摄不同吹炼时期的转炉炉口火焰照片, 再用摄像头将这些照片摄入计算机. 图像文件选

用 BMP 格式存储.

图像预处理的工作包含自动阈值提取、对比度拉伸和边缘检测. 其中自动阈值提取和对比度拉伸都是基于图像的灰度直方图的. 直方图是一幅图像中各像素灰度值出现次数(或频数)的统计结果, 由直方图可看出图像总的亮度和对比度情况以及图像像素值的动态范围等一系列该图像的特征信息. 而且, 往往一幅图像上的背景与物体在直方图上会呈现出双峰性, 在这种情况下可以比较容易地根据两峰之间的谷值, 来确定图像的阈值.

一幅图像的对比度与该图像中灰度的分布情况有关. 由于各方面的原因, 整幅图像的灰度变化范围往往很小. 为了增加图像局部或全局的反差, 可以用灰度变换的方法使灰度变化范围增大. 这样做可以使原来级差很小的图像变得灰度层次丰富, 一方面视觉感知更清晰, 另一方面使图像处理更可靠<sup>[2]</sup>.

因为火焰与黑色转炉的明暗对比强烈, 所以摄取的火焰图像, 局部的灰度层次不丰富, 而进行纹理分析所需要的正是火焰内部的灰度变化情况. 于是, 在预处理时先采用阈值提取的方法确定火焰的范围, 再对火焰部分做对比度拉伸, 使其特征明显, 便于进一步的处理.

设可获得的图像灰度变化范围为  $[g_{\min}, g_{\max}]$ , 而现有的图像灰度范围仅为  $[f_{\min}, f_{\max}]$ , 即  $[f_{\min}, f_{\max}] \subset [g_{\min}, g_{\max}]$ , 可以作变换:

$$g = T(f), f \in [f_{\min}, f_{\max}] \quad (1)$$

课题中采用线性变换,即满足:

$$g = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \cdot f + \frac{g_{\min} \cdot f_{\max} - g_{\max} \cdot f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (2)$$

图像边缘定义为图像中灰度发生急剧变化的区域边界,图像灰度的变化情况可以用图像灰度分布的梯度来反映,因此我们可以用局部图像微分技术获得边缘检测算子.设 $(\nabla f(x,y))$ 为图像的梯度,则

$$\nabla f(x,y) = [\partial f / \partial x, \partial f / \partial y]^T \triangleq [f_x, f_y]^T \quad (3)$$

$(\nabla f(x,y))$ 中包含局部灰度的变化信息,其幅度为 $e(x,y)$ ,即

$$e(x,y) = \sqrt{f_x^2(x,y) + f_y^2(x,y)} \quad (4)$$

$e(x,y)$ 可以用作边缘检测算子.为了计算上的简单也可以用偏导数 $f_x, f_y$ 的绝对值作为灰度变化的幅值

$$e(x,y) = |f_x(x,y)| + |f_y(x,y)| \quad (5)$$

局部边缘方向可以用方向角表示:

$$\phi(x,y) = \arctan(f_y / f_x) \quad (6)$$

梯度值可以用下面的梯度算子来计算:

$$\hat{f}_x = \omega_1 x \quad (7)$$

$$\hat{f}_y = \omega_2 y \quad (8)$$

其中 $x, y$ 是包含局部图像领域像素的矢量, $\omega_1, \omega_2$ 是用梯度掩模描述的权矢量. Sobel 边缘检测器即是这种掩模的一个例子,如图 1 所示.这种算子很容易在空间域中实现. Sobel 边缘检测器可以产生较好的边缘检测效果,而且受噪声的影响也比较小.当使用大的领域时,抗噪声特性会更好,但是这样做要增加计算量而且得出的边缘也较粗.

-1	0	1	1	2	1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	-1	-2	-1

图 1 Sobel 算子梯度掩模

Fig.1 Sobel edge operator

另外一种常用的边缘检测方法是利用拉普拉斯算子.拉普拉斯算子是根据图像 $f(x,y)$ 在 $x, y$ 方向上的二阶偏导数定义的:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (9)$$

因为图像边缘有大的灰度变化,所以图像的一阶偏导数在边缘处取局部最大值或最小值,那么二阶偏导数在边缘处会通过零点(由正到负或由负到正).用拉普拉斯算子检测边缘就是估算拉普拉斯算子的输出,找出它的零点位置.下面是拉普拉斯算子的一种估算方法:

$$\nabla^2 f(x,y) = f(x,y) - 1/4[f(x,y+1) + f(x,y-1) + f(x+1,y) + f(x-1,y)] \quad (10)$$

微分是一种高通运算,所以二阶微分会增强噪声对图像的影响.拉普拉斯算子有时找到的边缘是伪边缘,特别是在图像灰度变化不大的区域,因为这时小的灰度干扰(噪声)便可能使二阶导数产生过零输出.

图 2 是 Sobel 算子和拉普拉斯算子的应用实例.图(a)为一幅经过对比度拉伸后的火焰图像;图(b)是 Sobel 算子检测到的边缘,图(c)为拉普拉斯算子的检测结果.由实例可以看到,拉普拉斯算子对炉口火焰图像的边缘提取毫无效果,而 Sobel 算子的检测结果较为理想.

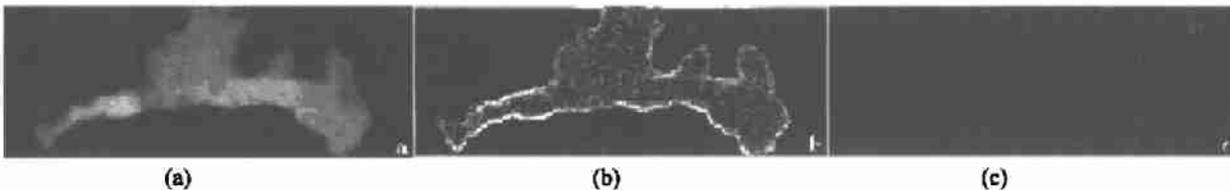


图 2 应用实例.(a)对比拉伸的火焰图像,(b)Sobel 边缘,(c)拉普拉斯边缘

Fig.2 Applied example of flame image(a), Sobel operator (b) and laplacian (c)

## 2 转炉炼钢炉口火焰的纹理分析

与其他图像特征或描述相比,纹理性质能够更好地兼顾图像宏观性质与细部结构这两个方面.所以,选择图像的纹理特征作为分析图像的着眼点与出发点.一般,随机型纹理图像用纹理分析的统计方法来处理.本课题对转炉炉口火焰的处理即采用纹理分析的统计方法.

最简单的纹理描述是基于图像直方图 $p(f)$ 的.视觉系统所观察到的图像窗口中的纹理基元必然对应于一定的概率分布的直方图,其间存在着一定的对应关系.若将连续的图像窗口的直方图的相似性进行比较,就可以发现和鉴别纹理基元排列的周期性及紧密性等.

令 $f_k, k=1, 2, \dots, N$ 为不同的图像灰度级,则图像的均值可以表示为:

$$\mu = \sum_{k=1}^N f_k p(f_k) \quad (11)$$

基于直方图的纹理描述方法的主要优点是计算简单。但虽然相同的纹理基元具有相同的直方图，而相同的直方图却可能对应不同的纹理基元。因此，运用直方图进行纹理基元的分析和比较的最大缺点是不能表达纹理的空间域特征。

图像中的结构关系信息存在于不同灰度像素间的总体的或平均的空间关系之中。这种结构关系信息可以用相对频数矩阵来表示。Haralick 等人提出采用灰度空间依存矩阵或叫灰度共生矩阵，来表征图像中的结构特征。纹理描述的另一种方法就是计算图像的灰度共生矩阵。这种空间关系矩阵是由图像中像素值的空间关系计算出来的特征矩阵，最基本的形式为  $P(i, j)$ ，即一种相对频数或概率密度函数，其数值为在一定大小的窗口内 2 个相邻的像素具有灰度  $i$  和  $j$  的频数。灰度值  $i$  和  $j$  的两个像素的空间位置可以考虑不同的相互距离 ( $d$ ) 及不同的角度或方向 ( $\theta$ ) 关系。灰度共生矩阵的完全形式为  $P(i, j; d, \theta)$ 。  $d, \theta$  的一般形式可以写为：

$$p(i, j) = \#\{(x, y), (x', y') : f(x, y) = i, f(x', y') = j; x = x' + dx, y = y' + dy\} \quad (12)$$

其中，#代表灰度值  $i$  和  $j$  共同出现的数目； $(x, y)$  及  $(x', y')$  是 2 个像素的坐标位置； $dx$  和  $dy$  是 2 个像素的相对位置差，两者构成一个图像位移向量  $(dx, dy)$ ，是位移向量集合  $D$  中的一个元素(包括了  $d$  和  $\theta$ )，即：

$$D = \{(dx, dy)\} \quad (13)$$

共生矩阵  $C_d$  的大小为  $N \times N$ ，其中  $N$  为图像的灰度级数。共生矩阵中含有非常有价值的纹理空间组织信息：如果纹理粗糙，则共生矩阵的分布集中于对角线附近；如果纹理很细，共生矩阵的分布则比较分散；如果纹理具有较强的方向性，当位移矢量与纹理方向一致时，其共生矩阵的分布会集中在主对角线上。Haralick 提出了 14 个基于图像灰度共生矩阵的纹理特征<sup>[9]</sup>。其中有 4 个统计参数为应用灰度共生矩阵进行纹理分析的主要参数。

(1) 角二阶矩。

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p^2(i, j) \quad (14)$$

角二阶矩是图像灰度分布均匀性的度量。当灰度共生矩阵中的元素分布较集中于主对角线时，说明从局部域观察图像的灰度分布是均

匀的，从图像整体来观察，纹理较粗，此时角二阶矩值  $f_1$  则较大，反过来则角二阶矩值  $f_1$  较小。角二阶矩是灰度共生矩阵像素值平方的和，所以，它也称为能量。粗纹理角二阶矩值  $f_1$  较大，可以理解为粗纹理含有较多的能量。细纹理  $f_1$  较小，也即它含有较少的能量。

(2) 对比度。

$$f_2 = \sum_{n=0}^{N-1} n^2 \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i, j) \right\} \quad (15)$$

式中， $|i-j|=n$ 。

图像的对比度可以理解为图像的清晰度，即纹理清晰程度。在图像中，纹理的沟纹越深，则其对比度  $f_2$  越大，图像的视觉效果越是清晰。

(3) 相关。

$$f_3 = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} ij p(i, j) - u_1 u_2}{\sigma_1^2 \sigma_2^2} \quad (16)$$

式中  $u_1, u_2, \sigma_1, \sigma_2$  分别定义为：

$$u_1 = \sum_{i=0}^{N-1} i \sum_{j=0}^{N-1} p(i, j) \quad u_2 = \sum_{j=0}^{N-1} j \sum_{i=0}^{N-1} p(i, j)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=0}^{N-1} (i - u_1)^2 \sum_{j=0}^{N-1} p(i, j) \quad \sigma_2^2 = \sum_{j=0}^{N-1} (j - u_2)^2 \sum_{i=0}^{N-1} p(i, j)$$

相关是用来衡量灰度共生矩阵的元素在行的方向或列的方向的相似程度。例如，某图像具有水平方向的纹理，则图像在  $\theta=0^\circ$  的灰度共生矩阵的相关值  $f_3$  往往大于  $\theta=45^\circ, \theta=135^\circ$  或  $\theta=90^\circ$  的灰度共生矩阵的相关值  $f_3$ 。

(4) 熵。

$$f_4 = - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i, j) \log p(i, j) \quad (17)$$

熵值是图像所具有的信息量的度量，纹理信息也属于图像的信息。若图像没有任何纹理，则灰度共生矩阵几乎为零阵，则熵值  $f_4$  接近于零。若图像充满着细纹理，则  $\hat{p}(i, j)$  的数值近似相等，此时该图像的熵值  $f_4$  最大。若图像中分布着较少的纹理， $\hat{p}(i, j)$  的数值差别较大，则该图像的熵值  $f_4$  较小。

根据各特征变量的物理意义和转炉炉口火焰的实际情况，选择照片编号分别为 F13, F17, F23, F28 和 F30, F34, F37 的 7 幅两炉钢的火焰图像为样本数据，对该组图像的纹理特征进行具体分析。除以上介绍的 5 种纹理特征外，另选择以原图像为基础提取的阈值做为一个特征变量。经过分析计算得知这些火焰图像的纹理没有明显的方向性，因而一律选择  $d=1, \theta=0^\circ$  的灰度共生矩阵。在计算时，为了忽略浮点运算可能带来的影响，没有将灰度共生矩阵进行归一

化处理,因此,部分数据值较大。

该7幅图像的纹理特征如表1所示。

观察以上7组数据,可以发现如下规律:

(1)吹炼初期和末期燃烧反应都不剧烈,火焰范围较小,图像灰度较均匀,纹理特征比较相似;而吹炼中期反应剧烈,夹杂浓烟,时有喷溅现象,纹理清晰,纹理特征有较大不同,容易区分。

(2)末期火焰因为温度较高,火焰内灰度分布较均匀,直方图表现出较明显的双峰性,自动提取的阈值较初、中期火焰图像偏高,均大于90。

(3)吹炼末期,化学反应趋于平稳,火焰较软,纹理细小,不清晰;特征变量上的表现为末期火焰图像的灰度共生矩阵对比度较小,熵值绝对值较大。

(4)不同炉次的部分图像纹理特征值离散性较大,而同炉次的该图像特征值之间有一定规

律可循。

以初期火焰图像(每炉钢摄取的第一幅图像)的纹理特征值作为基准,将其他几幅图像的特征值与之相比,得到表2的数据。

分析上述数据可以看出,角二阶矩与相关的比值没有什么规律,而末期的对比度比值较小,末期熵值的比值一般大于1。

本课题所面临的是仅仅分为两类的问题,即是或非终点图像。因此,采用最直观简单的“模板匹配法”,分类准则使用一个条件判断语句,即定义各特征变量同时符合下述条件的图像为终点图像:阈值(nThreshold)大于90,均值(TF\_feature.mean)大于25,角二阶矩(TF\_feature.moment)小于 $4.6 \times 10^8$ ,对比度(TF\_feature.contrast)小于 $5.1 \times 10^6$ ,相关值(TF\_feature.correlation)大于-2.66,熵的比值(TF\_feature.entropy/TF\_feature0.entropy)大于1。

表1 样本图像的纹理特征

Table 1 Texture features of sample images

吹炼时期	图号	阈值	均值	角二阶矩	对比度	相关	熵
初期	F13	77	29.958 0	3 931 323 278	992 824	-1.885 3	-786 816
初期	F30	83	23.089 5	187 369 206	5 326 466	-3.175 4	-807 045
中期	F17	71	35.867 1	3 098 392 764	19 089 569	-1.314 6	-754 645
中期	F34	69	18.822 2	9 788 004	5 236 001	-4.786 1	-802 539
中后期	F23	78	37.383 2	2 747 831 384	14 159 588	-1.209 9	-719 821
末期	F28	97	27.509 6	155 772 388	5 053 998	-2.235 6	-808 562
末期	F37	103	27.449 1	292 746 950	4 757 920	-2.246 2	-815 349

表2 纹理特征值比值

Table 2 Ratio of texture features

特征	F13 (初期)	F17 (中期)	F23 (中后期)	F28 (末期)	F30 (初期)	F34 (中期)	F37 (末期)
角二阶矩	1	0.788 1	0.699 0	0.039 6	1	0.052 3	1.562 4
对比度	1	1.922 7	1.426 2	0.509 0	1	0.983 0	0.893 3
相关	1	0.698 2	0.641 8	1.185 8	1	1.507 2	0.707 4
熵	1	0.959 1	0.914 8	1.027 6	1	0.994 4	1.010 3

### 3 转炉炼钢终点的计算机视觉检测识别系统

系统的总体及其各部分已初步形成。系统由摄像子系统、显示子系统、图像处理子系统和通讯、键盘等辅助子系统构成。图像处理子系统可以对图像加以处理并输出各种工艺数据,主要分为硬件和软件两大部分。

本程序的用户界面如图3所示。

对在现场(邯郸钢铁集团公司第一炼钢厂2号20t转炉)采集的51幅转炉炉口火焰的照片进行了处理和终点判断。其特征值符合下列情况的图像的终点标志设为“真”(TRUE),否则为“假”(FALSE):阈值大于90,均值大于25,角二阶矩小于 $4.6 \times 10^8$ ,对比度小于 $5.1 \times 10^6$ ,相关值大于-2.66,熵的比值大于1。终点标志为“真”的图



图3 用户界面

Fig.3 User interface

像即判断为终点图像。应用本系统判断出的3幅终点照片全部正确。

本系统的响应时间约为0.9s,可以满足现场对检测识别系统的实时性要求。

#### 4 结论

纹理反映了图像的整体性质。实践证明,将纹理分析的老方法用于氧气顶吹转炉炼钢的吹炼终点判断上是可行的。纹理特征提取所得的数据并不是杂乱无章,而显得规律明显。限于数据量,对纹理特征的分析尚不够深入。作为图像特征的总体描述,纹理分析比数字变换直观,又

比细微分析空间大,它的独特空间与整体性势必为图像分析乃至基于图像的工况分析带来新的思路。用计算机视觉和数字图像处理技术检测转炉炼钢吹炼终点的方法和技术方案是可行的。

#### 参考文献

- 1 冯聚和. 氧气顶吹转炉炼钢. 北京: 冶金工业出版社, 1995
- 2 Rosenfeld A, Kak A C. Digital Picture Processing. New York: Academic Press Inc, 1982
- 3 Haralick R M. Texture Features for Image Classification. IEEE Trans, 1973, SMC-3(6):610

### Estimate Blowing Final Point by Analysing Texture Features of Top-blowing BOF Vessel Mouth Flame

YOU Jia, WANG Shaochun, LI Xisheng, HAN Yiping

Information Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** A new measuring method and a technical scheme of recognition system are proposed, which estimate the BOF final point by analysing the texture features of the flame images obtained from converter vessel mouth. Major work include the flame images collecting, preprocessing, computing and selecting the texture features, and analysing and comparing these features. An application program was also worked out. According to the data obtained from experiment, it is demonstrated that this method and technical scheme are feasible. The scheme avoids the difficulty of complicated mechanism modeling, has no request of the vessel mouth size, and costs comparatively low. It is suitable for medium or small size converters.

**KEY WORD** BOF steelmaking; flame; digital Image processing; texture analysis