

数字化煤岩分析系统的设计与实现

王文韬¹⁾ 胡德生²⁾ 尹文义¹⁾ 丁佩律³⁾ 王海川³⁾ 刘其真¹⁾

¹⁾(复旦大学计算机科学系, 上海 201900) ²⁾(上海宝钢研究院工艺研究所, 上海 201900)

³⁾(复旦大学电子工程系, 上海 200433)

摘要 为了能够快速准确地进行煤岩自动分析, 设计了一个数字化煤岩分析系统. 该数字化煤岩分析系统是一个集显微图象采集、煤岩成分识别和煤质分析 3 大功能于一体的综合性系统. 在用该系统进行煤岩分析时, 首先使用代价函数极值法实现自动聚焦, 然后采用瞬间曝光测试法来实现自动曝光, 最后用主分量分析法实现煤岩纹理分析和煤岩成分识别, 并应用神经网络实现混煤分析中的函数参数估计. 由上述方法构成的煤岩分析系统已投入实际应用, 实际应用效果表明, 应用该系统不仅提高了煤岩分析的效率和准确性, 且运行稳定可靠, 在速度和精度方面均令人满意.

关键词 计算机应用其他学科(520·6099) 煤岩分析 自动聚焦 自动曝光 纹理分析 成分识别 神经网络参数估计

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)07-0783-05

Design and Implementation of Digital Coal Petrography Analysis System

WANG Wen-tao¹⁾, HU De-sheng²⁾, YIN Wen-yi¹⁾, DING Pei-lu³⁾

WANG Hai-chuan³⁾, LIU Qi-zhen¹⁾

¹⁾(Department of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433)

²⁾(Steel Technology Research Center, Bao Steel Company, Shanghai 201900)

³⁾(Department of Electronic and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract Digital coal petrography analysis system introduced in this paper is an integrated system that has three main functions; image acquisition, composition recognition and analysis of quality of coal. The key techniques of this system are auto-focus, auto-exposure, texture analysis, pattern recognition and analysis of coal petrography. A price-function is used to implement auto-focus; it is the sum of the gray grads of all pixels in three small windows in the same image, and is determined by the Z-Axis of the lens of microscope; the need is met when the function takes extremum value. Auto-exposure is achieved by using a test of exposing in a very short time; the correct exposure time can be calculated with the gray histogram of the image obtained in the testing exposure. Studied the features of the composition of coal, the methods of classifying by gray threshold and principal component analysis (PCA) are adopted to implement texture analysis and pattern recognition. Moreover, some other techniques like estimating of parameters by use of artificial neural network are used in this system. The experimental results show that all these methods can greatly improve the efficiency and veracity of analysis of coal petrography. Both the speed and the precision of coal petrography analysis are satisfactory. The system is used in the industrial research successfully.

Keywords Coal petrography analysis, Auto-focus, Auto-exposure, Texture analysis, Composition recognition, Neural network, Parameter estimating

基金项目: 国家自然科学基金项目(69975004)

收稿日期: 2002-08-02; 改回日期: 2003-03-06

0 引言

煤岩特性(煤岩镜质组反射率及其分布、煤岩组成等)是煤的重要评价指标.传统的煤岩分析是用显微光度计通过人工选择几十个点来测定煤岩镜质组反射率及其分布,而煤岩组分则是人工在显微镜下用数点法进行统计的.由于传统方法没有利用“图象”中所蕴涵的大量有用信息,其不仅效率低下,而且分析的精确度不高,因此,研究如何利用图象处理技术^[1,2]来自动地完成上述过程,并提高分析的效果就成为一个迫切需要解决的问题^[3,4].

为此,笔者研制成功了一个数字化煤岩分析系统.该系统运行于 Windows 95/98/NT 平台,用 Microsoft Visual C++ 6.0 开发,其可以有效地完成显微镜控制、自动聚焦、自动曝光、图象采集、煤岩成分自动分析、数据显示、后期数据库建立和数据处理等功能.

1 系统结构和主要模块

数字化煤岩分析系统硬件构成如图 1 所示,其中包括一台 ZEISS 公司的 Axioplan 显微镜,一台显微镜控制器,一架 Axiocam CCD 摄像机,一台 PC 机,以及相应的接口卡等.

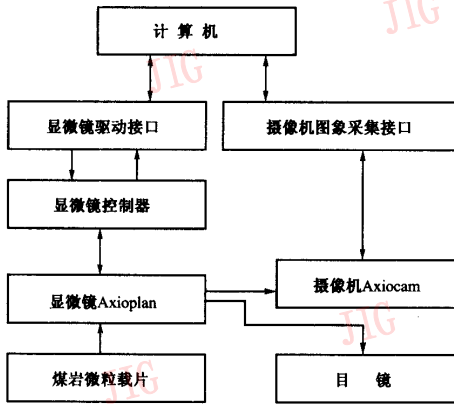


图 1 煤岩分析系统硬件框图

数字化煤岩分析系统的软件系统分为在线数据采集子系统和离线数据分析子系统.其中在线数据采集子系统用于采集煤岩图象,采集到的图象经过处理后即生成相应的成分数据文件,此文件的内容

包括各种成分的比例,反射率分布等等成分信息;离线数据分析子系统用于对这些数据文件进行管理和分析,包括建立数据文件库,显示数据文件内容,进行相关分析和处理,报表的打印等.

1.1 在线数据采集子系统

在线数据采集子系统分为如下 4 个不同的模块:

(1) 用户控制模块 用于响应用户的输入和对系统进行控制,包括向显微镜控制模块发出移动、开关快门等命令,并接受显微镜控制模块返回的状态信息;向摄像头发出采集图象的命令,用于获取图象并显示;以及用于发送图象给数据处理模块进行处理,并保存处理后的数据.该模块通过一个对话框对象来实现上述功能,并通过按钮响应用户的命令和通过调用别的模块提供的命令来完成所要求的操作.

(2) 显微镜控制模块 主要分为如下两个部分:一部分向用户控制模块提供显微镜移动、快门和速度等设置的高级接口函数;另一部分,通过提供底层接口卡的写入读出函数,以实现高级接口函数的功能.

(3) 摄像头控制模块 用于为用户控制模块提供一套接口函数,包括曝光时间的设置 SetExposureTime(),从该系统缓冲区 Snap()采集灰度图象,初始化摄像头 AcamInit()等,该模块通过 Zeiss 公司提供的的一个开发包实现.

(4) 图象处理模块 该模块利用图象处理技术来获得煤岩的不同组成成分的相关信息,比如各成分所占的比例,各成分的反射率分布情况等.该模块的主要难点是开发一个快速有效的分析算法.

1.2 离线数据分析子系统

离线数据分析子系统分为如下 5 个模块:

(1) 用户菜单模块 用于响应用户的命令和控制其余模块完成用户所要求的操作.本模块使用单文档界面,其菜单命令包括数据文件的打开和保存、打印、煤质分析、察看煤质分析报告、标准煤(作为煤岩判定依据的已知单种煤;在本项研究中,可以认为单种煤,即镜质组反射率分布只有一个峰值的煤)数据库的管理、帮助等等一系列命令.

(2) 文件管理模块 用于完成采集系统输出的原始数据文件的打开和保存煤质分析报告文件.

(3) 显示和打印模块 用于完成数据文件的图形显示和煤质分析结果的显示和打印.

(4) 标准库管理模块 负责标准煤数据库的管理,包括增加和删除标准煤数据文件等操作,同时提供读取标准煤数据的接口函数。

(5) 煤质分析模块 利用标准库提供的信息对当前煤岩数据文件进行分析,以得到煤质分析报告所要求的各项统计数据 and 分类信息。

2 系统的关键技术

2.1 自动聚焦

在系统中是使用一个代价函数来实现基于数字图象的自动聚焦。理论和实践结果表明,聚焦不准的数字图象相当于经过了一个低通滤波器,而低通滤波器将会降低图象的灰度梯度。设以围绕图象中心的一个 $W \times W$ 大小的窗口为检测窗(检测窗也可位于其他位置),并设检测窗内像素点灰度值为 $V(x, y)$,则可用 $L(x, y)$ 表示该点的梯度值

$$L(x, y) = \left| V(x, y) \times 9 - \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 V(x+i, y+j) \right| \quad (1)$$

设计代价函数为 C_k ,其表达式为

$$C_k = \frac{1}{W \times W} \sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^W L(x, y), L(x, y) > T_L \quad (2)$$

式中, T_L 为预先设定的梯度阈值,小于 T_L 的值将不被累加。在系统中,选取了位于同一对角线上的 3 个检测窗口,并取这 3 个窗口的 C_k 均值为总代价函数 C 的值,即

$$C = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 C_k \quad (3)$$

根据 C 值,再按照一定的步长移动显微镜 Z 轴,即可不断计算所采集图象的 C 值,并选 C 值最大时的 Z 轴位置为调焦终点,而该过程按照步长的大小可以分为粗调和微调。

2.2 自动曝光

系统设计了一个简单有效的自动曝光算法,称为瞬间曝光测试法。

因为自动曝光要避免图象的灰度集中分布在很低的区域(曝光不足)或者在很高的区域(曝光过度),而笔者在研究中发现,灰度和曝光时间在一定范围内近似线性关系,所以提出了如下自动曝光的算法:

(1) 设置一个最小曝光时间 t_{\min} ;

(2) 测定该曝光时间下图象的灰度直方图,从直方图中得到一个灰度 V_1 ,其中灰度超过 V_1 的点数不超过一个预先设定的点数阈值 N_V ,在本项研究

中,取 N_V 为图象总点数的 2%。为了加快运算速度,只选取了一个区域作为代表来进行相应的计算。

(3) 按照如下公式可得到正确的曝光时间 t

$$t = \frac{250}{V_1} \times t_{\min} \quad (4)$$

实际上,可先采用一个很短的时间 t_1 来对图象进行曝光,然后按照上述条件来取 V_1 值。

2.3 灰度与反射率的转换

由于通过显微镜摄像头获取的图象,在电脑上 是 256 阶的灰度图象,而最终需要统计的是反射率 图象,因此需要对两者进行转换。经过多次实验,最 后得到了一个函数关系式

$$G = aR^2 + bt^2 + cRt + dR + et + f \quad (5)$$

其中, G 是灰度, R 是反射率, t 是曝光时间, a, b, c, d, e, f 为待定系数。该函数的形式固定,但是各待定 系数会因每次实验光照条件和周围环境的不同而有 所改变。实际处理时,在每次大批量图象数据采集之 前,需要预先拍摄多个已知其反射率的标准片,并对 每个标准片都采用多种曝光时间进行拍摄,即可得 到其各自的平均灰度和曝光时间;然后根据各标准 片的不同反射率列出方程组,再用最小二乘估计来 求出在均方误差最小意义下的各系数的解;最后根 据这个函数,即可将每个点的灰度转换成相应的反 射率,再经统计即得到相应成分的反射率分布。

2.4 图象分割

在煤岩图象中,存在多种成分的图象。在本系统 中,主要识别和分割出镜质组、非镜质组和黏结剂这 3 种成分,其主要成像特征如下:

(1) 镜质组:主要具有光滑、均匀的特点,反射 率适中。

(2) 非镜质组:一般是纹理粗糙,有很长的直条 纹贯穿,反射率通常比镜质组高。

(3) 黏结剂:显著特点是反射率很低,一般在 0.3% 以下,其在灰度图象中呈深色调。

考虑到黏结剂的灰度特征,可采用阈值方法将 其分割出来;而可采用主分量分析(PCA, Principal component analysis)的方法来对镜质组和非镜质组 进行分割。研究表明,在使用 PCA 方法时,第 1 个主 分量反映出了图象块的整体灰度,而其他分量则 能体现出图象的频谱信息;同时这种方法由于还具 有一旦训练结束后,分析时为向量投影,因此相对于 其他算法计算量很小。

图象分割算法的流程如图 2 所示。

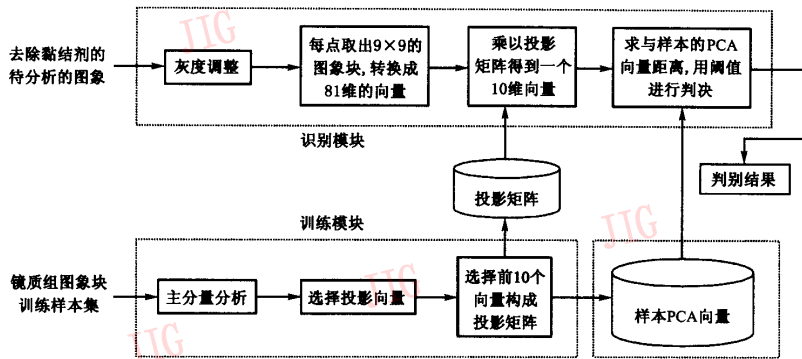


图 2 PCA 分析方法流程图

2.5 混煤分析

实际分析中,有的煤可能是由两种或者两种以上的煤混合而成,对于这种情况,则要利用标准煤数据库中的标准煤岩数据信息,分析出组成该煤的煤种,以及它们各自混合的比例。

混煤分析的算法分为如下两部分:一是确定煤种,二是确定比例。

考虑到构成混煤的各种单种煤,其镜质组反射率分布的峰值位于不同的位置,那么在混合之后,混煤主要煤种的镜质组反射率的峰值将依然存在,因此,通过比较各标准煤的镜质组反射率分布的峰值和待分析煤种的镜质组反射率分布的峰值,即可以大致确定混煤的煤种。

确定混煤煤种之后,就可以根据全组分(去除黏结剂之后的所有成分)的反射率分布来确定各煤种所占的比例。因煤岩反射率一般分布在区间(0.000, 0.030)内,故假设将反射率分成 60 个等级,则可设构成混煤的各煤种全组分反射率分布分别是 $f_1(R_i), f_2(R_i), \dots, f_n(R_i), i=1, \dots, 60, f(R_i)$ 表示该煤种中反射率等于 R_i 的成分出现的频度,那么混煤的全组分反射率分布为

$$f(R_i) = a_1 f_1(R_i) + a_2 f_2(R_i) + \dots + a_n f_n(R_i) \quad i=1, \dots, 60 \quad (6)$$

其中, a_1, a_2, \dots, a_n 是各煤种在混煤中所占的比例。系统要完成的任务就是确定这些参数。在本系统中是使用神经网络的 BP 算法^[5]来确定这些参数,计算公式如下

$$a_i(t+1) = a_i(t) + \delta \times (\tilde{f} - f) \times f_i \quad (7)$$

其中, f 和 \tilde{f} 分别代表按照比例求出的反射率分布和实际混煤的反射率分布, $a_i(t)$ 表示时刻 t 时的混煤比例,这些比例一开始在 0.2 至 0.5 之间随机确定,然后以 δ 为训练步长,同时限制混煤比例不能出现负值,再通过对该网络进行反复训练,以使得按比例计算的混煤反射率分布和实际混煤的反射率分布之间的误差达到近似最小值,此时所得 a_i 即为所求混煤比例。

3 实验结果

为了验证本文算法的效果,取一种典型的多峰混煤作为测试用例进行了实验,测试得到的反射率曲线如图 3 所示。

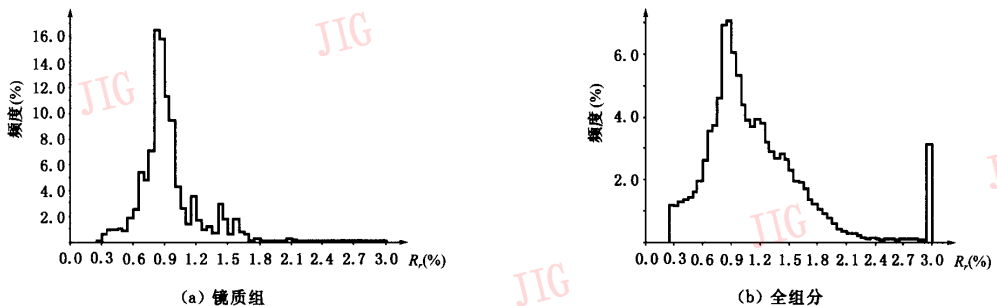


图 3 样品镜质组与全组分反射率图

表1给出了对上述混煤分别进行3次实验分析的结果。由表1可以看出,在镜质组反射率 R_r (下角r代表镜质组)为0.69%~1.18%的范围内,其主要成分的分析结果波动甚小,且与实际情况基本相符;但在 R_r (下角t代表全组分)为1.43%和1.59%的地方摆动稍大,这主要是因为该混煤的全组分反射率 R_t 在2.9%附近有峰值,而镜质组反射率分布中没有对应的峰所致,这是任何标准煤都不具有的特征。

表1 实验结果对照表(R_r 表示镜质组反射率)

实验结果1		实验结果2		实验结果3	
R_r (%)	所占比例(%)	R_r (%)	所占比例(%)	R_r (%)	所占比例(%)
0.69	4	0.69	5	0.69	5
0.84	74.7	0.84	75.2	0.84	74.8
1.18	17.9	1.18	17.6	1.18	19.2
1.43	6.3	1.43	4.4	1.43	2.1
1.59	7	1.59	2.3	1.59	3.6

据统计,在使用本系统进行实际处理时,自动聚焦的时间一般小于20s,其完全可以满足用户的需要,且自动曝光的应用效果也很好。根据各种煤的特性不同,图象平均灰度大致分布在100到160之间,因此可使灰度与反射率的转换结果更精确;实验结果表明,在此基础上进行的图象分割,精度很高,据专家估计,一般图象误差小于2%,成分交错情况严重的则小于5%,其结果相对于人工操作毫不逊色,而速度则大幅提高。

利用上述神经网络算法进行混煤分析时,对于普通的样品,经多次实验计算,相对误差一般小于2.0%,某些样本反复实验计算的结果甚至完全一致;在速度方面,网络一般在运行20至50次终止,在Pentium MMX 166、32M RAM的机器上,只需约10s时间即可完成混煤分析,因此完全满足要求。

4 结 语

本文所介绍的数字化煤岩分析系统,已用Visual C++ 6.0实现,其中的自动聚焦、自动曝光、煤岩纹理分析、煤岩成分识别、混煤分析以及函数参数估计等关键技术,均为自行开发研制的。目前该系统已投入使用,使用结果表明,该系统功能比较强大、用户界面友好、操作简单、分析速度快、精确度高,可满足煤岩自动分析的要求,并受到用户的好评。另外,该系统结构模型和方法具有普适性,可方便地用于其它的显微图象采集和分析系统。

参 考 文 献

- 1 Castleman Kenneth R. Digital image processing[M]. 北京:清华大学出版社,1997:423~440.
- 2 崔屹. 数字图象处理技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社,1997:93~162.
- 3 Riepe Wolfgang, Steller Monika. Characterization of coal and coal blends by automatic image analysis[J]. Fuel, 1984, 63(3): 313.
- 4 Pearson David E. Numerical modeling of reflectance of coking coals[A]. In: Ironmaking Conference Proceedings[C], Chicago, Illinois, USA, 1994: 50~51.
- 5 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1999:44~48.



王文韬 1976年生,2002年获复旦大学计算机科学与工程系硕士学位。主要研究方向为模式识别、图象处理、机器学习、数据挖掘以及软计算理论等。



胡德生 1962年生,上海宝钢研究院主任研究员。主要研究方向为炼焦配煤技术和煤岩自动分析。曾获国家科技进步二等奖一项,冶金部科技进步二等奖一项,已发表论文18篇。



尹文义 1979年生,复旦大学计算机科学与工程系硕士研究生。主要研究方向为模式识别、图象处理、工业监控以及人工智能等。



丁佩律 1978年生,2002年获复旦大学电子工程系硕士学位,现为美国普渡大学电子工程系博士研究生。主要研究方向为信号处理和图象处理。



王海川 1978年生,复旦大学电子工程系硕士研究生。主要研究方向为图象处理和模式识别。目前从事人脸识别研究。



刘其真 1945年生,复旦大学计算机科学与工程系教授。主要研究方向为模式识别、图象处理、自动控制、人工智能以及遥感技术等,曾获教育部科技进步二等奖一项,已发表论文50余篇。