

文章编号:1672-3961(2008)02-0061-05

基于三色法和BP神经网络的回转窑温度检测

姚福安¹, 庞向坤¹, 焦莹莹², 王忠林³, 张锡满⁴

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101;

3. 滨州学院物理与电子科学系, 山东 滨州 256600;

4. 日照公路管理局, 山东 日照 276800)

摘要:回转窑内的燃烧是个非常复杂的过程,针对以往温度测量的不足,根据三基色原理和 Plank 定律建立三色测温公式,结合光学技术和图像处理技术,提出了一种基于 BP 神经网络模型的温度场测量方法.同时给出系统的软、硬件的设计及工程实现.实验结果表明,该系统简便实用,与传统测量相比,它具有测量精度高和适应性强等优点,可满足系统温度场的在线检测,并能对炉内的燃烧状况做出符合实际的评价.

关键词:三色法测温;回转窑;图像处理;BP神经网络

中图分类号:TK311 **文献标志码:**A

Temperature detection of a rotary kiln based on three-color measurement and the BP neural network

YAO Fu-an¹, PANG Xiang-kun¹, JIAO Ying-ying², WANG Zhong-lin³, ZHANG Xi-man⁴

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. College of Physics and Electronic Science, Binzhou University, Binzhou 256600, China;

4. Rizhao Roads Administration, Rizhao 276800, China)

Abstract: Burning is a very complex process in a rotary kiln, for lack of temperature detection in the past. A three-color temperature measurement formula was established on the basis of three primary color principles and the plank law. Combined with digital image processing and optical technology, a method of temperature detection based on the BP neural network was put forth. The software and hardware design of this system were presented, and the engineering realization was also given. The results show that this system is simple and convenient for practical application, which has higher measurement accuracy and better suitability than the traditional detection method. This technology can be used to realize the on-line detection of the temperature field, and evaluate the combustion situation in the furnace in conformity with reality.

Key words: three-color temperature detection; rotary kiln; digital image processing; BP neural network

0 前言

回转窑是现代水泥生产的最为关键的设备之一.回转窑内,通过燃料的燃烧形成高温,并通过燃烧的控制,使燃料燃烧后形成的火焰有一定的长度、

形状和稳定性,以保证在回转窑内形成工艺所要求的一定温度区间,同时窑炉是一个非线性,大滞后的复杂时变系统,在燃烧过程中窑头工况,特别是烧成带温度最为关键,是最重要的参数,将直接影响到熟料的烧结质量、产量和生产成本,以及人员和设备的安全.因此从火焰图像中重建火焰温度场是一项非

收稿日期:2007-09-07

作者简介:姚福安(1963-),副教授,主要从事智能控制系统的研究.

E-mail: yaofuan@sdu.edu.cn

常有必要的工作。

1 测量原理

1.1 回转窑内温度场的辐射机理

水泥回转窑内燃料与一次风由窑头喷入,和二次风相遇并一起进行燃烧,火焰温度高达 1650 ~ 1700 °C.在烧成带,被加热对象是缓慢运动的固、液相物料,温度在 1300 ~ 1500 °C,火焰发光主要是由于碳氢化合物在火焰中未完全燃烧以及高温下分解形成的燃烧颗粒所造成的,灼热的燃烧颗粒在可见光和红外线区域发出连续光谱,其辐射能是二氧化碳、水蒸汽等三原子气体辐射能的 2 ~ 3 倍,因此,火焰中的颗粒辐射占火焰辐射的主导地位,这样对火焰辐射也可以做近似灰体处理^[1].

1.2 三色法测温原理^[2-5]

在 400 ~ 700 nm 的辐射波长内,而温度在 3000 K 以下时,Plank 定律可由维恩定律^[6]取代,因此有:

$$E_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda} \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right), \quad (1)$$

式中: $E_{\lambda}(T)$ 为辐射能, T 为灰体的温度(K), λ 为波长(μm), ϵ_{λ} 是温度为 T 时的光谱发射率. $C_1 = 3.742 \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$, $C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$, 它们分别为第一、第二辐射常数. 彩色 CCD 可以把入射光分解为波长不同的红(r)、绿(g)、蓝(b)三色图像,在每个像素位置,通过图像采集卡其采样和量化,这样我们就可以利用图像处理技术获取数字图像中任意点在不同波长下的光强值,光强值 $L_{\lambda}(T)$ 与火焰辐射能 $E_{\lambda}(T)$ 成正比,即 $L_{\lambda}(T) \propto E_{\lambda}(T)$, 并且与 CCD 的光谱响应灵敏度 S_{λ} 有关,其公式为:

$$L_{\lambda}(T) = K S_{\lambda} E_{\lambda}(T), \quad (2)$$

其中 K 是个常量. 我们取不同波长的两光强度值之比,则

$$\frac{L_{\lambda R}(T)}{L_{\lambda B}(T)} = \frac{S_{\lambda R}}{S_{\lambda B}} \cdot \frac{\epsilon_{\lambda R}}{\epsilon_{\lambda B}} \cdot \left\{ \frac{\lambda_B}{\lambda_R} \right\} \cdot \exp\left\{ -\frac{C_2}{T} \left[\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right] \right\}, \quad (3)$$

$$\frac{L_{\lambda B}(T)}{L_{\lambda G}(T)} = \frac{S_{\lambda B}}{S_{\lambda G}} \cdot \frac{\epsilon_{\lambda B}}{\epsilon_{\lambda G}} \cdot \left\{ \frac{\lambda_G}{\lambda_B} \right\} \cdot \exp\left\{ -\frac{C_2}{T} \left[\frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_G} \right] \right\}, \quad (4)$$

对(3),(4)两式进行比值运算,可求得

$$T = C_2 \left\{ \frac{2}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} \right\} \left[\ln \frac{L_{\lambda R}(T) \cdot L_{\lambda G}(T)}{L_{\lambda B}^2(T)} + \ln \frac{S_{\lambda R} \cdot S_{\lambda G}}{S_{\lambda B}^2} + \ln \frac{\epsilon_{\lambda R} \cdot \epsilon_{\lambda G}}{\epsilon_{\lambda B}^2} + 5 \ln \frac{\lambda_R \cdot \lambda_G}{\lambda_B^2} \right], \quad (5)$$

上式中光谱响应灵敏度 $S_{\lambda R}$, $S_{\lambda G}$ 和 $S_{\lambda B}$ 的比值可

以从光谱响应特性获得,根据灰体各波长的发射率都相同. 则 $\left(\frac{\epsilon_{\lambda R}}{\epsilon_{\lambda G}} \right) = \left(\frac{\epsilon_{\lambda G}}{\epsilon_{\lambda B}} \right) \approx 1$, 即 $\ln \frac{\epsilon_{\lambda R} \cdot \epsilon_{\lambda G}}{\epsilon_{\lambda B}^2} \approx 0$, 则上式可简化为

$$T = \frac{C_2 \left\{ \frac{2}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} \right\}}{\ln \frac{L_{\lambda R}(T) \cdot L_{\lambda G}(T)}{L_{\lambda B}^2(T)} + \ln \frac{S_{\lambda R} \cdot S_{\lambda G}}{S_{\lambda B}^2} + 5 \ln \frac{\lambda_R \cdot \lambda_G}{\lambda_B^2}}. \quad (6)$$

前文提到, CCD 采集的图像在计算机内实际上是以 R, G, B 为波长的三色图像,其光强值分别为 $L_{\lambda R}, L_{\lambda G}, L_{\lambda B}$, 通过 R, G, B 的不同组合还可以得到以下两种不同的公式:

$$T = \frac{C_2 \left\{ \frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_R} \right\}}{\ln \frac{L_{\lambda R}(T) \cdot L_{\lambda B}(T)}{L_{\lambda G}^2(T)} + \ln \frac{S_{\lambda R} \cdot S_{\lambda B}}{S_{\lambda G}^2} + 5 \ln \frac{\lambda_R \cdot \lambda_B}{\lambda_G^2}}, \quad (7)$$

$$T = \frac{C_2 \left\{ \frac{2}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_G} \right\}}{\ln \frac{L_{\lambda G}(T) \cdot L_{\lambda B}(T)}{L_{\lambda R}^2(T)} + \ln \frac{S_{\lambda G} \cdot S_{\lambda B}}{S_{\lambda R}^2} + 5 \ln \frac{\lambda_G \cdot \lambda_B}{\lambda_R^2}}. \quad (8)$$

此即为基于燃烧火焰的灰体性假设的彩色 CCD 的三色测温公式,实际测量中,上述 3 组取其中一组即可.

2 系统组成

图 1 为系统组成框图. 整套系统由光学子系统、CCD 工业摄像机、计算机软硬件、显示及冷却、清洁等辅助子系统构成. 计算机硬件是工业控制机(IPC-610)、3D 图形加速卡、17 英寸纯平显示器、打印机、图像采集卡^[7](标准复合视频信号输入, 32 位真彩)、100 M 网卡等组成. 软件系统由图像采集管理、数据滤波管理、图像的去彩处理、火焰和温度场的计算等组成. 它是一个典型的多任务系统, Windows 操

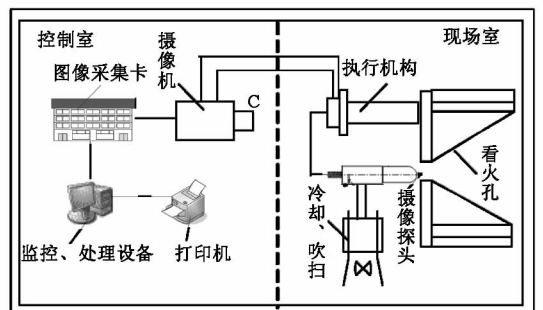


图 1 系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of system

作系统在系统应用中效果不理想,经常被程序中其他的控制函数阻塞,而 Win32 的多线程机制很好的解决了这个问题.

3 数字图像的预处理^[8,9]

3.1 数字信号的滤波处理

由于一幅数字图像的获得,要经过光学系统成像、CCD 采集、视频信号转换、图像卡采集等多个环节,不可避免地存在中间环节的衰减、温漂等干扰,加之本文研究对象的动态脉动成像特性,所采集的图像必然含有各种噪声.

图像预处理是图像工程中最为基础,也是最重要的操作步骤,后续的图像分析和图像理解等高层操作都是建立在它的基础之上的.

中值滤波器由 JUKEY J W 在 1971 年提出并应用在一维信号处理(时间序列分析)中,后来被二维图像信号处理技术所引用,是一种非线性的滤波器.中值滤波是一种非线性处理技术,在一定的条件下可以克服线型滤波如图像邻域平均法、均值滤波带来的图像细节模糊,而且对滤除脉冲干扰及图像邻域平均法最有效,其优越性如下:

我们以一维模板为例,只考虑水平方向,大小为 3×1 ,Box 模板为 $1/3 \times [1 \ 1 \ 1]$,高斯模板为 $1/4 [1 \ 2 \ 1]$. 结果见表 1.

表 1 图像的滤波处理对比

Table 1 Comparison among imaging processing

原图	经 Box 模板处理后	经 Gauss 模板处理后	经中值滤波处理后
1 2 10 2 1	$\frac{13}{3} \ \frac{14}{3} \ \frac{13}{3}$	$\frac{15}{4} \ 6 \ \frac{15}{4}$	2 2 2
1 3 11 3 1	5 $\frac{17}{3}$ 5	$\frac{9}{2} \ 7 \ \frac{9}{2}$	3 3 3
1 2 10 2 1	$\frac{13}{3} \ \frac{14}{3} \ \frac{13}{3}$	$\frac{15}{4} \ 6 \ \frac{15}{4}$	2 2 2

从上表中不难看出,中间的灰度要比两边高许多,这也是一类很典型的图,称之为脉冲.可见,中值滤波对脉冲噪声非常有效.

一幅图像的分辨率越高,则图像的质量越好、越逼真.但在计算机中就占用更多的内存量,相应的计算和存储量越大.如一幅 512×512 大小的回转窑彩色图像,需占用内存 $512 \times 512 \times 24/8/1024 = 0.8 \text{ Mb}$,则每秒钟 25 帧(PAL 制式)的数据量将达到 21 Mb,由此可见数据量的如此巨大! 这给计算机的实时处理提出了很高的要求.因此采用快速中值滤波法以响应系统实时处理的要求.

由于在实际运算过程中不需要图像的统计特

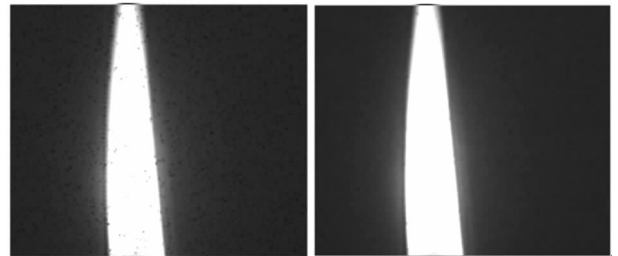
征,因此也带来不少方便,但同时有一个较大的缺点,即对邻近的像素值进行排序,导致算法运行速度慢.为了解决此问题,我们设计了快速中值滤波,即直接计算中序值,不进行排序,这样就节省了时间.对于 $N \times N$ (N 为大于 3 的奇数)个像素值,中序值的特征为:

(1) 比中序值小的像素值数目 + 与中序值相等的像素值数目 $\geq (N \times N + 1)/2$;

(2) 比中序值大的像素值数目 + 与中序值相等的像素值数目 $\geq (N \times N + 1)/2$.

然而, R, G, B 三色彩色图像是三维信号,因此在处理时,因注意把三维信号分解成 3 个二维信号,在运用二维中值滤波的方法进行滤波.

通过试验表明:快速中值滤波不但能够在保证滤波效果很好的情况下,减少算法的耗时,满足火焰图像噪声消除的要求,增加滤波算法的实用性,其算法效果如图 2.



(a) 原始图像(加噪) (b) 滤波后的图像

图 2 滤波图像对比

Fig.2 Image filtering comparison

3.2 图像的文件格式

常见的图像文件格式有位图文件(*.BMP)、TGA 文件(*.TGA)、PCX 文件(*.PCX)、GIF 文件(*.TIF)、TIFF 文件(*.TIFF)等.在 Windows 系统中,最常用的图像格式是位图格式,其文件名以 BMP 为扩展名.未压缩的 BMP 图像中的像素数值正好与实际要处理的数字图像相对应,这种格式的文件最合适我们对之进行数字化处理,BMP 文件由文件头、位图信息头、颜色信息和图形数据.

3.3 BMP 文件组成

BMP 文件由文件头、位图信息头、颜色信息和图形数据 4 部分组成.文件头主要包含文件的大小、文件类型、图像数据偏离文件头的长度等信息;位图信息头包含图像的尺寸信息、图像用几个比特数值来表示一个像素、图像是否压缩、图像所用的颜色数等信息.颜色信息包含图像所用到的颜色表,显示图像时需用到这个颜色表来生成调色板,但如果图像为真彩色,既图像的每个像素用 24 b 来表示,文件中就没有这一块信息,也就不需要操作调色板.文件

中的数据块表示图像的相应的像素值,需要注意的是:图像的像素值在文件中的存放顺序为从左到右,从下到上,也就是说,在BMP文件中首先存放的是图像的最后—行像素,最后才存储图像的第一行像素,但对与同一行的像素,则是按照先左边后右边的顺序存储的.另外一个需要关注的细节是:文件存储图像的每一行像素值时,如果存储该行像素值所占的字节数为4的倍数,则正常存储,否则,需要在后端补0,凑足4的倍数.

4 BP神经网络^[10,11]

BP神经网络是一种多向层前向神经网络,它采用了反向传播的学习理论,BP神经网络通过计算机样本实际输出与网络输出之间的误差,并根据此误差反向传播,误差的反传是将输出误差以某种形式通过隐含层向输入层反传,并将误差分摊给各层的所有单元,从而获得各层的单元的误差信号,此误差信号即作为修正各单元的权值的依据,最终使网络输出逼近样本实际输出,达到训练神经网络的目的.

由上式可知,CCD摄像机的R,G,B的光亮度分备为 $L_{\lambda R}, L_{\lambda G}, L_{\lambda B}$,与温度T成一定的关系,即:

$$T = f(L_{\lambda R}, L_{\lambda G}, L_{\lambda B}).$$

Kolmogorov定理已经证明:给定任意一个连续函数,在满足一定的条件下,可以由一个三层网络来实现.利用三层BP神经网络来构造一个“黑箱”,并通过神经网络的自学习以逼近该函数关系,网络输入为三项:亮度值为 $L_{\lambda R}, L_{\lambda G}, L_{\lambda B}$,取一个隐含层,隐含层的神经元数取8,单项输出,输出为需要得到的温度,输入层到隐含层的激活函数采用非对称型Sigmoid函数,即 $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$.隐含层到输出层的激活函数采用线型函数.通过黑体炉的标定得到 $(T, L_{\lambda R}, L_{\lambda G}, L_{\lambda B})$ 的关系,把它作为教师信号,对该网络进行训练.如下图3所示.

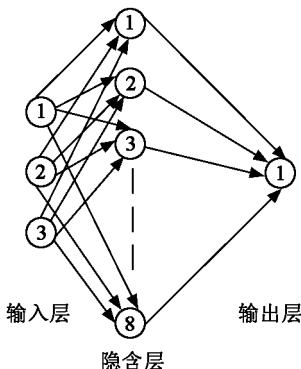


图3 神经网络结构图
Fig.3 Structure of neural network

BP神经网络温度标定法误差见下表2.

表2 神经网络对黑体炉的计算结果
Table 2 Comparison of neural network computing results and Blackbody furnace

	黑体炉温度/计算温度				最大绝对误差	均差
实测值 T/K	1250	1260	1300	1350	5.5	3.8
计算值 T/K	1254.2	1256.8	1297.6	1344.5		

5 实验结果分析

利用上述系统配置和算法下检测的试验结果和数据如下,其中图4为监测的火焰图象,图5为火焰燃烧温度场的分布图像,图6为采用上述算法所得到的二维温度场,它真实的反应了火焰的形状和温度场的分布.



图4 监测的火焰图象
Fig.4 Original flame image

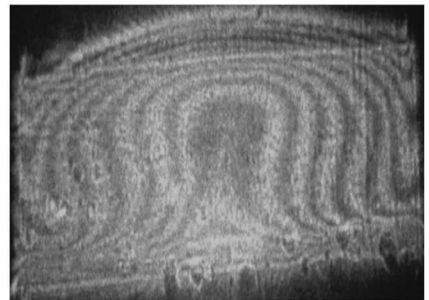


图5 燃烧火焰温度场分布
Fig.5 Distribution of flame temperature

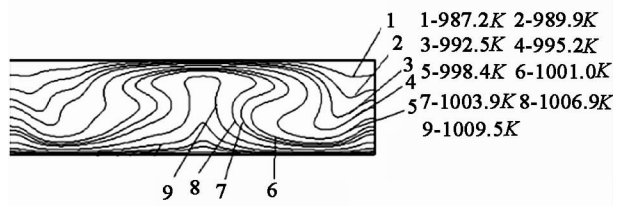


图6 燃烧火焰等温线
Fig.6 Flame isotherm

6 实验结论

图像法进行水泥回转窑火焰检测和物料温度场

的分布检测,涉及了光学、数学、计算机科学、信号处理等多种学科以及相关的生产工艺,属于多种学科交叉的边缘课题.将基于图像处理的三色测温法和BP神经网络等技术应用到水泥回转窑炉的测温系统中,较大程度上提高了测量的精度,具有广泛的应用前景,随着测量精度以及可靠性的进一步提高,基于计算机图像处理的火焰温度检测方法作为一种非接触式、动态实时在线检测的手段,在科研和生产领域有广泛的的应用的前景.但是由于燃烧的复杂性,研究过程中还有很多问题需要解决.

参考文献:

- [1] 杨世铭. 传热学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1991.
YANG Shi-ming. Heat transfer[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 1991.
- [2] 姜学东, 韦穗. 基于彩色 CCD 的三色法测量炉膛火焰温度场分布[J]. 安徽大学学报, 2002, 26(2): 24-26.
JIANG Xue-dong, WEI Sui. Three-colour measurement of furnace's flame temperature field distribution based on colour CCD [J]. Journal of Anhui University, 2002, 26(2): 24-26.
- [3] 余岳峰, 赵铁成, 徐伟勇. 煤粉燃烧火焰的三色法温度测量[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(9): 1257-1260.
YU Yue-feng, ZHAO Tie-cheng, XU Wei-yong. Three-color measurement of temperature applied to pulverized coal combustion[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(9): 1257-1260.
- [4] 唐秉湘, 滕召胜, 王卓. 基于彩色 CCD 的火焰温度检测算法研究[J]. 中国仪器仪表, 2006, 6: 66-68.
TANG Bing-xiang, TENG Zhao-sheng, WANG Zhuo. Measuring methods research of flame temperature based on color CCD [J]. China Instrumentation, 2006, 6: 66-68.
- [5] 王震洲, 刘教民, 贺代春. 基于彩色 CCD 的三色法测量电弧温度场分布[J]. 河北科技大学学报, 2005, 26(1): 23-26.
WANG Zhen-zhou, LIU Jiao-min, HE Dai-chun. Three-color measurement of arc temperature field distribution based on CCD [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2005, 26(1): 23-26.
- [6] 王兴安, 梅飞鸣. 辐射换热[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
WANG Xing-an, MEI Fei-ming. Radiation heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [7] 北京嘉恒中自图像技术有限公司. OK 系列 PCI 图像卡用户手册[Z]. 北京: 科技出版社, 2002.
Beijing Jiaheng Zhong Zi Image Technology Company. OK series PCI graphics card user manual [Z]. Beijing: Science Press, 2002.
- [8] 杨淑莹. VC++ 图像处理程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
YANG Shu-ying. VC++ image processing program design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [9] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
YUAN Qiu-qi. Digital Image processing [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2001.
- [10] 张乃绕, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
ZHANG Nai-rao, YAN Ping-fan. Neural networks and fuzzy-control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [11] 周志华, 曹存根. 神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
ZHOU Zhi-hua, CAO Cun-gen. Neural network and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

(编辑: 陈斌)