

研究简报

# 氧化铝回转窑烧成带火焰图像识别系统

孙 鹏<sup>1</sup>, 柴天佑<sup>1,2</sup>, 周晓杰<sup>1,2</sup>, 岳 恒<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室; <sup>2</sup> 东北大学自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

关键词: 回转窑烧成带; 火焰图像识别系统; 火焰图像处理; 模式识别

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 07-1839-04

## Flame image recognition system for alumina rotary kiln burning zone

SUN Peng<sup>1</sup>, CHAI Tianyou<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiaojie<sup>1,2</sup>, YUE Heng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education, Northeastern University; <sup>2</sup> Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China)

**Abstract:** In the rotary kiln alumina production process, because of the complexity and variability of rotary kiln burning zone conditions, some important quality index related process parameters can not be detected continuously on-line. Detecting the different burning zone conditions on-line is a key factor for the whole process automation of alumina industry. The current method depends on flame observation by naked eye. In order to realize automated recognition of burning zone conditions, a method which learned experience and knowledge from naked eye observation was proposed to recognize burning zone conditions by utilizing the image processing technique and pattern classification method. At first, features were extracted from flame images of rotary kiln burning zone and were combined with some important process parameters to constitute a hybrid feature vector. Then a model with a binary tree based SVM (support vector machine) was constructed. At last, a flame image recognition system was developed. The system was successfully applied to a domestic alumina plant, and good economic benefit was realized.

**Key words:** alumina rotary kiln burning zone; flame image recognition system; flame image processing; pattern classification

### 引 言

烧结法氧化铝回转窑生产工业过程是典型的复杂工业过程, 具有多变量、强耦合、大滞后等综合复杂性特点, 许多与产品质量指标密切相关的过程变量无法实现在线连续检测。回转窑烧成带工艺过程是烧结法氧化铝生产工艺的关键环节, 长

期以来处于一种依靠人工观测烧成带火焰图像来实施生产控制的半自动化状态。由于人工观测过程缺乏严格统一的操作标准, 生产控制容易受到操作工人主观因素的影响而波动, 难以保证长期的生产过程稳定与合格的产品质量。

信息获取与处理的方式丰富了现代控制科学与技术的内容, 决定了自动化的形式、内容的深入与

2008-04-16 收到初稿, 2008-04-30 收到修改稿。

联系人及第一作者: 孙鹏 (1978—), 男, 博士研究生。

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目 (B08015); 教育部科学技术研究重大项目 (308007); 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA041404)。

Received date: 2008-04-16.

Corresponding author: SUN Peng. E-mail: sunspeech2000@yahoo.com.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2007AA041404).

拓展<sup>[1]</sup>。为了解决常规检测手段无法实现烧成带工况连续在线检测的问题，很多学者尝试使用图像处理技术与模式分类方法来模拟人工观测过程，进行烧成带火焰图像识别方法与系统的研究<sup>[2-3]</sup>。这些研究更多地讨论了烧成带火焰图像处理技术与特征提取方法，较少涉及应用系统的设计与开发。而且，上述方法忽略了那些与烧成带工况密切相关的过程检测数据，在某种程度上并不能对烧成带工况及其变化趋势进行全面、准确的识别。本文提出了一种利用火焰图像特征与关键过程数据融合进行烧成带工况识别的方法，介绍了系统实现的软、硬件平台结构以及系统软件功能模块的设计。实践证明，该系统的应用满足了氧化铝回转窑工业过程的实际需要。

### 1 系统体系结构

图 1 所示为氧化铝回转窑烧成带火焰图像识别系统体系结构，其中①为图像处理模块，②为烧成带工况识别模块。图中各符号定义如下： $I_{in1}$  为氧化铝回转窑烧成带火焰图像； $I_{in2}$  为过程数据检测； $I_{in3}$  为关键过程数据； $I_{in4}$  为反馈图像信号； $I_{out1}$  为火焰图像特征序列  $S_f$ ； $I_{out2}$  为工况识别结果  $S_d$ ； $M_{rule1}$  为模型调整规则 1； $M_{rule2}$  为模型调整规则 2； 为专家经验单元。系统工作过程描述如下：图像处理模块①采集回转窑烧成带火焰图像  $I_{in1}$ ，平滑滤波后采用基于灰度直方图的快速 FCM (fuzzy C-means) 聚类算法进行聚类分割<sup>[4-5]</sup>，得到分割后的火焰区与物料区数据。根据专家经验，计算整体平均灰度  $G_{avr}$ 、物料高度  $M_h$ 、闪烁频率  $F_s$ ，黑影面积  $S_a$ ，并根据人类视觉特点，选取对颜色判

断影响最大的火焰区平均  $R$  值、物料区平均  $R$  值来表征物料颜色  $R_m$  与火焰颜色  $R_f$ 。最后，得到烧成带火焰图像特征序列： $S_f = \{G_{avr}, M_h, F_s, R_m, R_f, S_a\}$ 。烧成带工况识别模块②的输入分别为  $I_{in4}$  关键过程数据序列 {烧成带温度测量值  $T_{BZ}$ ，冷却机电流  $I_{cm}$ ，窑头温度  $T_{RH}$ ，窑尾温度  $T_{BE}$ } 与  $I_{out1}$  火焰图像特征序列  $S_f$ ，它们共同组成了混合特征序列  $S_i$ 。 $I_{out2}$  为模式识别模块②的输出，即烧成带工况分类结果  $S_{rec}$ 。 $I_{in2}$  与  $I_{in4}$  分别表示现场过程检测数据与烧成带火焰图像，作为反馈信号通过数据挖掘单元与专家经验单元被引入模式识别模块，根据模型调整规则  $M_{rule1}$  和  $M_{rule2}$  来实现对识别模型的在线调整。

烧成带工况识别模型通过历史数据样本离线训练的策略来学习人工看火过程的基本经验，并采用在线反馈调整的方式来跟踪烧成带工况识别过程的动态特性。混合特征序列  $S_i$  作为识别模型的输入，输出为烧成带状态识别结果  $S_{rec}$ 。根据烧结法氧化铝回转窑工艺过程特点与现场看火操作工人的操作经验，可以将烧成带状态分为 3 类：欠烧结状态、正烧结状态和过烧结状态。现场的看火操作工人通常根据烧成带当前所处的状态及下一阶段的状态变化趋势来调节控制系统，对回转窑工业过程进行控制。设  $S_{rec}(t)$  为  $t$  时刻模型输出的烧成带状态识别结果，将  $t$  时刻识别结果  $S_{rec}(t)$  与  $t-1$  时刻状态识别的结果  $S_{rec}(t-1)$  相比较，得到当前状态变化趋势  $\Delta S_{rec}(t)$ ，其中  $\Delta S_{rec}(t) = S_{rec}(t) - S_{rec}(t-1)$ 。识别模型为二层结构的正态二叉树支持向量机分类模型<sup>[6-9]</sup>，模型参数选择如下：核函数采用 RBF 径向基函数，具体参数与识别正确

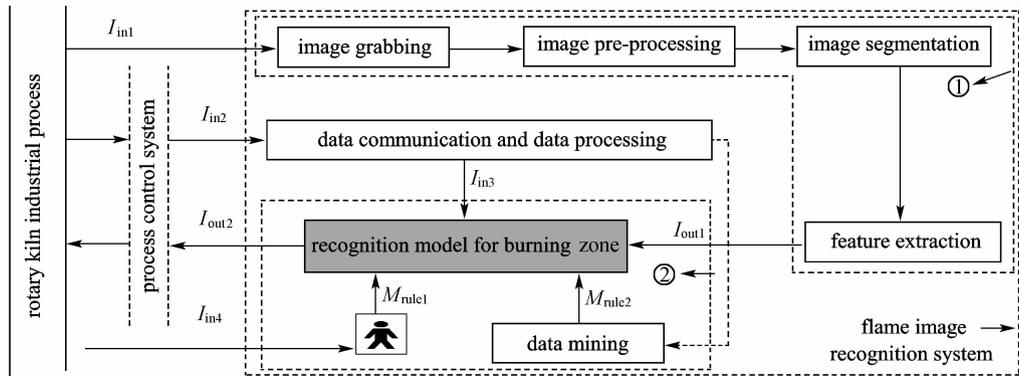


图 1 氧化铝回转窑烧成带火焰图像识别系统体系结构

Fig. 1 Framework of flame image recognition system for alumina rotary kiln burning zone

表 1 基于火焰图像特征与过程数据融合的  
回转窑工况识别结果

Table 1 Recognition results of rotary kiln conditions based on flame image features and process parameters

BT-SVM	C	g	Over burning	Normal burning	Below burning
the first layer	$C_{11}=32$	$g_{11}=0.00781$			
the second layer	$C_{21}=2$	$g_{21}=0.00593$	97.4%	100%	95.2%
	$C_{22}=2$	$g_{22}=0.00368$			

率结果如表 1 所示。

## 2 系统软、硬件平台

### 2.1 系统硬件平台

如图 2 所示，系统硬件平台基于传统的面向工业过程应用的多媒体监控系统硬件平台，主要由工业摄像机、云台解码器、网络视频传输设备、Matrox MeteorII 图像采集/处理卡、工业控制计算机、存储设备与显示设备等共同组成。

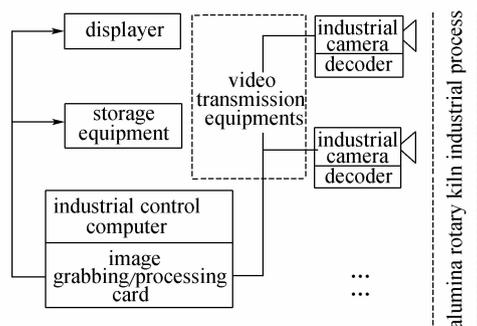


图 2 系统硬件平台结构

Fig. 2 System hardware platform

### 2.2 系统软件平台

如图 3 所示，系统的软件运行环境主要由 Matrox MIL8.0、SQL SERVER、OPC COM Custom Interfaces 3.0 三个主要部分构成，Win32 操作系统为上述软件平台构件及系统软件提供了稳定的运行支持环境，并提供基于 TCP/IP 的网络数据传输机制。

## 3 系统软件设计

### 3.1 基于多线程的总体设计

由于图像处理与工况识别算法部分比较复杂，需要占用较多的 CPU 计算资源，而与此同时系统又需要连续不断地采集烧成带火焰图像和过程数据来实现视频监控报警以及过程数据监控。因此，为了在图像采集、压缩、传输、显示与存储的同时，

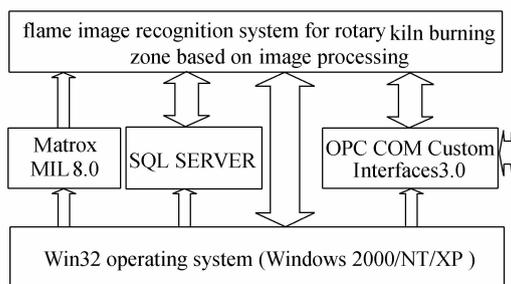


图 3 系统软件平台结构

Fig. 3 System software platform

能够进行实时的图像处理与工况识别，采用了基于 Win32 的多线程程序设计方法<sup>[10]</sup>，设计了两个独立线程：视频监控与过程数据通讯线程 thread1、图像处理与工况识别线程 thread2 (图 4)。

### 3.2 软件功能模块设计

(1) 人机交互界面 将客户区分割为 3 个不同的显示区间，分别用来实时显示回转窑烧成带火焰视频图像、火焰图像特征与工况识别结果和过程数据数值及其趋势显示。

(2) 视频监控模块 视频监控模块在进行视频显示、压缩、存储的同时，使用动态检测技术<sup>[11]</sup>对回转窑烧成带内衬进行监控，对由于温度过高导致耐火砖脱落而引发的设备故障进行报警。

(3) 过程数据通讯模块 利用 OPC (OLE for process control) 规范提供的 COM 组件<sup>[12]</sup>编写 OPC 客户端<sup>[13]</sup>，以 C/S 方式建立与 OPC 服务器的连接<sup>[14-15]</sup>，通过定制的工业数据接口，实时读取现场设备检测数据。

(4) 图像处理与工况识别模块 利用图像采集卡对摄像机采集的烧成带火焰模拟图像进行数字化送入图像数据缓存区，进行平滑、分割、特征提取后，融合关键过程数据组成混合特征输入工况识别单元进行烧成带状态及变化趋势的自动判别，火焰图像特征与烧成带状态识别的结果显示在客户区窗口。

## 4 系统应用

本系统于 2003 年 11 月投入生产试运行后为操作工提供了科学、统一的操作依据，将主观因素的影响降至最低，保证了熟料烧成生产的平稳性，延长了熟料窑内衬的使用寿命，提高了熟料窑运转效率，实现了节能降耗的目的。以下是烧成带火焰图像识别系统在  $t$  时刻获得的一组烧成带火焰图像特征和烧成带工况自动识别信息。

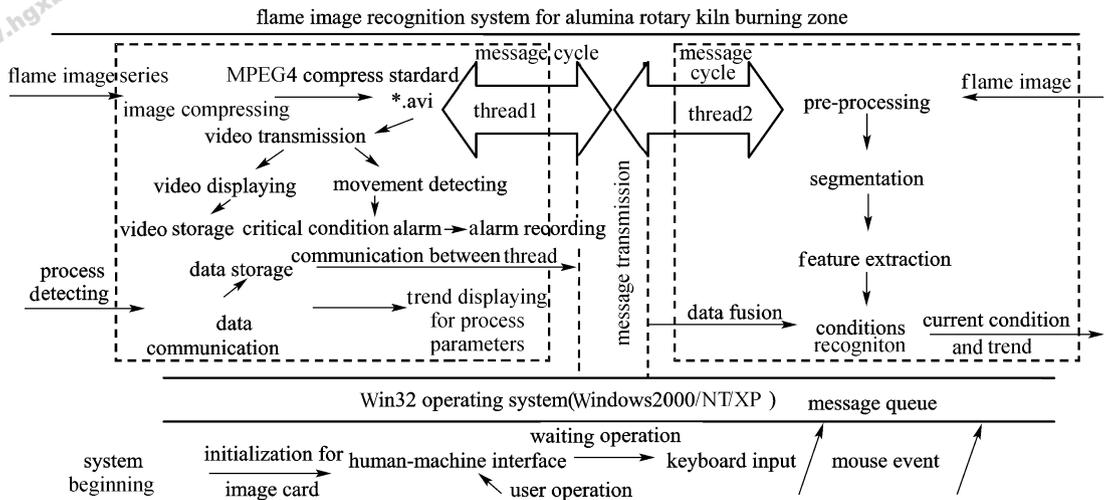


图 4 基于多线程的系统软件总体设计

Fig. 4 Outline of software design based on multithread

(1) 烧成带火焰图像特征:  $G_{avr} = 72$ ,  $M_h = 106$ ,  $R_m = 183$ ,  $R_l$ —黄亮,  $F_s = 10$ ,  $S_a = 440$ 。其中, 火焰颜色  $R_l$  根据专家看火经验被分为无、红火、红亮、黄亮、白亮几个等级。

(2) 同样, 根据烧成带火焰图像特征, 火焰等级被分为很低、偏低、正常和高 4 个等级, 物料等级被分为很低、偏低、正常和高 4 个等级。基于以上定义, 烧成带工况识别结果为 {火焰等级——正常、物料等级——偏低、烧成带工况——正烧成、工况变化趋势——平稳}, 烧成带温度检测值  $T_{bz} = 1280^{\circ}\text{C}$ 。

根据上述信息, 当前烧成带工况相对正常, 但温度开始下降, 建议快速且大幅度增加给煤量。

## 5 结 论

氧化铝回转窑烧成带图像识别系统模拟人工看火过程, 采用了基于火焰图像特征与关键过程数据融合的烧成带状态识别方法对与回转窑过程控制密切相关的烧成带状态及其变化趋势进行了机器识别的研究, 它的应用为氧化铝回转窑过程控制提供了丰富的辅助决策信息, 降低了看火操作工人的劳动强度, 提高了回转窑工业过程的自动化水平。

## References

[1] Zhang Tianxu (张天序). Research expectation and countermeasure of pattern recognition and intelligent system. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2002, **28** (suppl.): 92-95

[2] Li Shutao (李树涛), Wang Yaonan (王耀南), Zhang Changfan (张昌凡). Neural network control system for rotary kiln based on features of combustion flame. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2002, **4**: 11-12

[3] Tan Hao (谭皓), Li Liyuan (李立源), Chen Weinan (陈维南). Burner flame recognition based on back propagation neural network. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 1998, **24** (5): 667-670

[4] Cai Weiling, Chen Songcan, Zhang Daoqiang. Fast and robust fuzzy C-means clustering algorithms incorporating local information for image segmentation. *Pattern Recognition*, 2007, **40** (3): 825-838

[5] Cheng Taiwai, Goldfog D B, Hall L O. Fast fuzzy clustering. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, **93**: 49-56

[6] Hsu Chih-Wei, Lin Chih-Jen. A comparison of methods for multi-class support vector machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, **13** (2): 415-425

[7] Cao L J, Keerthi S S, Ong C J, Zhang J Q, Uvaraj Periyathamby, Xiu J F, Lee H P. Training of support vector machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, **17** (4): 1039-1049

[8] Alistair Shilton, Palaniswami M, Daniel Ralph, Ah Chung Tsoi. Incremental training of support vector machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, **16** (1): 114-131

[9] Burges C J C A. Tutorial on support vector machines for pattern recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, **2** (2): 121-167

[10] Jeff Prosis. *Programming Windows with MFC*. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 1999

[11] Tekalp A M. *Digital Video Processing*. New Jersey: Prentice Hall, 1995

[12] Pan Aimin (潘爱民). *The Theory and Principle of COM (COM 技术内幕)*. Beijing: Tsinghua University Press, 1999

[13] Xue Fuzhen (薛福珍), Lin Shengrong (林盛荣), Tang Yan (唐琰). Research and development of client application based on OPC data access specification. *Computer Engineering* (计算机工程), 2002, **28** (4): 229-231

[14] Xu Shixin (徐士信). OPC technology and application. *Automation in Petro-Chemical Industry* (石油化工自动化), 2000 (5): 6-8

[15] Ji Shengpeng (季胜鹏), Lin Zhongda (林中达). Client/server model design based on OPC specifications. *Electric Power Automation Equipment* (电力自动化设备), 2002, **22** (11): 59-62