

基于 DSP 的锅炉火焰温度场测量及燃烧诊断系统

张玉杰¹, 齐忆南¹, 上官国志²

(1. 陕西科技大学电气与电子工程学院, 咸阳 712081; 2. 大唐洛阳热电有限责任公司设备工程部, 洛阳 471000)

摘要: 针对电站锅炉火焰监视、温度场测量和燃烧诊断中存在的问题, 提出了一种以 DSP 为核心的嵌入式图像火焰监测系统, 在对彩色图像法测量温度场的原理论述的基础上, 对图像采集和处理各部分的电路和系统软件进行了分析和说明。通过优化设计, 使系统的数据处理能力和实时性得到大幅的提升。经过 200MW 机组的试验表明, 系统能在 1 帧时间内完成一幅图像的处理与特征量的提取, 在 1s 内完成锅炉燃烧状况的诊断, 火焰监测和燃烧诊断实时性得到了保证。温度场测量最大偏差不会超过 50, 相对误差小于 5%, 能满足系统对测量精度的要求。

关键词: 炉膛火焰; 温度场; 数字图像处理; 燃烧诊断; DSP

System of Flame Temperature Field Measurement in Furnace and Combustion Diagnosis Based on DSP

ZHANG Yujie¹, Qi Yinan¹, SHANGGUAN Guozhi²

(1. College of Electrical and Electronics Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xiayang 712081;

2. Department of Equipment Engineering, Datang Luoyang Pyroelectricity Co., Ltd., Luoyang 471000)

【Abstract】 This paper proposes embedded system for picture flame detection with the core of DSP, aiming at the problems on flame monitoring, temperature field measure and combustion diagnosis. On the basis of temperature field measure principle using color image method, all circuits and system soft of image acquisition and processing are analyzed and illuminated. Though optimum design, system ability of data processing and real-time is heightened heavily. Experimentation of 200MW unit shows that system can accomplish image processing, extract statistic feature within 1 frame time for one picture, and accomplish diagnosis for boiler burning conditions within 1 second. So the real-time of flame detection and burning diagnosis is assured. The maximum error of temperature distribution measure is at range of 50 and relative error is less than 5%. Therefore, these can meet the requirement of accuracy measurement.

【Key words】 Furnace flame; Temperature field; Digital image processing; Burning diagnosis; DSP

1 概述

火电厂锅炉炉膛内的燃烧过程是复杂的物理和化学过程, 火焰的温度场分布及燃烧状态对于电站锅炉的安全经济运行以及减少污染物的排放具有极其重要的现实意义。随着计算机技术和电子技术的发展, 以数字图像处理技术为核心的火焰图像监测系统日益成为主流。从火焰图像中提取更多的监视和诊断信息, 获得炉膛辐射水平的定量描述, 重建燃烧火焰的温度场分布, 此项应用技术已成为燃烧学科目前较为热门的研究方向之一。在火焰监视系统中, 对火焰图像检测处理均要求有较高的实时性。目前系统的硬件一般采用图像采集卡加计算机的结构, 这种系统结构存在着很大的局限性: (1) 图像处理过程面对的是大量的数据处理和复杂的算法的实现, 通用计算机来完成这些任务, 实时性无法得到保证, 致使大量的有用数据无法得到有效的利用。(2) 计算机负担过重, PC 机要承担所有的工作和其他的数据读取、存储操作, 如果运行的结果还要完成网络传输和数据库等操作, 系统的运行速度将受到严重影响。高温火焰温度场是燃烧过程极为重要的热工参数, 目前主要采用光学辐射高温温度计进行测量, 而这种测量方法只能炉膛局部点的测量, 无法实现温度场的测量。如何实时快速地实现火焰图像的处理和温度场的计算并进一步进行燃烧诊断成为亟待解决的问题。本文设计了一套以 DSP 为核心的嵌入式图像火焰温度场测量和燃烧诊

断系统, 用硬件来实现一部分 PC 的功能, 把软件算法嵌入到 DSP 中实现, 充分利用 DSP 的高速度和并行性, 不仅使数据处理能力和系统的实时性得到大幅的提升, 而且还减轻了 PC 的负担, 同时也增强了系统的可靠性。

2 温度场测量原理

高温火焰可认为近似为烟粒云辐射^[1], 而这些烟粒云的温度就反映了火焰的温度。发光火焰的温度测量, 实际上就是对火焰中烟粒云温度的测量。在辐射波长在小于 1 000nm 及温度在小于 3 000K 的范围内, 根据普朗克公式的维恩近似, 高温炉中一个小区域的光谱辐射能可表示为

$$M_{\lambda}(T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (1)$$

其中, $M(\lambda, T)$ 表示波长为 λ 辐射能, T 为热力学温度, $\varepsilon(\lambda, T)$ 为火焰的辐射率 C_1 、 C_2 分别为第 1、第 2 辐射常数。

由 CCD 获取的彩色火焰图像经过 A/D 转换后, 在计算机内是以像素为单位逐点存储的, 每一点存储的信息量都包含了该点的 R、G、B 3 种与接收到的辐射能成正比的亮度值。

基金项目: 陕西省教育厅专项基金资助项目(05JK159); 陕西省工业攻关项目(2006K05-G18); 陕西科技大学研究生创新基金资助项目
作者简介: 张玉杰(1966-), 男, 副教授、硕士, 主研方向: 图像处理与模式识别, DSP 应用开发; 齐忆南, 硕士; 上官国志, 工程师
收稿日期: 2006-09-20 **E-mail:** sxzhyj@163.com

在窄带宽假设下，R、G、B三色的亮度值 R_e 、 G_e 、 B_e ^[2]可表示为

$$\left. \begin{aligned} R_e &= k_R M_{\lambda_R}(T) \\ G_e &= k_G M_{\lambda_G}(T) \\ B_e &= k_B M_{\lambda_B}(T) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中， $k_i(i=R,G,B)$ 为系统各通道的增益系数。 $\lambda_R=700\text{nm}$ ， $\lambda_G=546.1\text{nm}$ 、 $\lambda_B=435.8\text{nm}$ ， M_{λ_R} 、 M_{λ_G} 、 M_{λ_B} 分别为R、G、B 3色的辐射能。 ε_{λ_R} 、 ε_{λ_G} 、 ε_{λ_B} 表示3色火焰的辐射率。

将式(1)带入式(2)，并转换为如下形式，即

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_e}{G_e} &= \frac{k_R}{k_G} \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda_R}}{\varepsilon_{\lambda_G}} \cdot \left[\frac{\lambda_G}{\lambda_B} \right]^5 e^{-\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G} \right)} \\ \frac{G_e}{B_e} &= \frac{k_G}{k_B} \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda_G}}{\varepsilon_{\lambda_B}} \cdot \left[\frac{\lambda_B}{\lambda_G} \right]^5 e^{-\frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_B} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(3)不难推出本区域温度T，即

$$T = \frac{C_2 \left[\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right]}{\ln \frac{R_e \cdot G_e}{B_e^2} + 5 \ln \frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_G} + \ln \frac{\varepsilon_R \varepsilon_B}{\varepsilon_G^2} + \ln \frac{k_R k_B}{k_G^2}} \quad (4)$$

有关资料见文献[3]， $\frac{\varepsilon_R \varepsilon_B}{\varepsilon_G^2} = 1.03$ ，而 $\frac{k_R k_B}{k_G^2}$ 可通过黑体炉

实验标定。由式(4)可知，图像上任一点对应的火焰温度可通过该像素点三基色亮度值唯一确定。

3 系统结构

系统的结构如图1所示，由光学系统、CCD摄像机和图像处理系统构成。光学系统为内窥光学潜望镜，利用它获取炉内火焰图像，经棱镜转向并用光纤引出后投射在CCD摄像机靶面上。为了使光学系统在炉膛内安全工作，系统通有冷却风降温。光学系统安装于锅炉上部30m标高处，其视野能有效地覆盖整个炉膛断面，获得全炉膛完整的火焰燃烧图像。

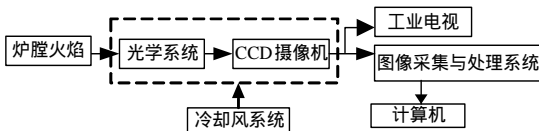


图1 系统结构

4 电路设计

图像采集与处理系统的硬件结构如图2所示，采用TMS320VC5416为核心处理器构成嵌入式火焰温度场测量与燃烧诊断系统。其硬件结构，由图像采集、DSP图像处理、CPLD逻辑时序控制、显示与键盘接口、电源等部分组成。

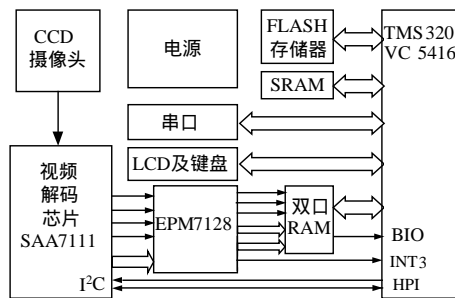


图2 系统的硬件结构

4.1 图像采集部分

图像采集部分包括SAA7111A、双口RAM及DSP控制电路。SAA7111A是Philips公司推出的高集成度的视频解码芯

片，可通过简洁的I²C总线设定SAA7111A的工作模式和读写状态，VREF(场同步)信号，HREF(行同步)信号、RTS0(奇偶场)信号和LLC2(像素时钟)信号都有管脚直接引出，省去以往时钟同步电路的设计，简化了接口电路，提高了系统可靠性^[4]。SAA7111A将摄像机输出的模拟视频信号转换成R:G:B=5:6:5的16位格式数字图像信号，并逐帧存入双口RAM中，通过中断通知DSP读取。按照CCIR-656格式，一幅图像包含720×572个像素点，火焰温度场测量并不需要计算如此密集像素点的温度值。而另一方面，为了充分地利用DSP片内64KB的双访问存储器，提高DSP的运行速度，应把一幅图像数据量压缩到64KB范围内。为此，采用分辨率为250×250作为一帧图像。在采集过程中，只采集奇场图像信号而不采集偶场图像信号，可利用偶场图像时间等待DSP处理图像。CPLD在VREF、HREF、BTS0信号均有效时，对LLC2进行二分频后的像素时钟信号进行计数。LLC2二分频后频率降为6.75MHz，使每行像素点减少为原来的一半，为360点，将其截头去尾，即在HREF上升沿出现后计前后55个像素无效，得到中间的250个像素点。由于只采奇场图像，行数也减少为原来的一半，为286行，在VREF上升沿出现后计前后18行无效，取中间250行，即得到分辨率为250×250的一幅图像。CPLD通过在线编程，产生上述采样中必需的LLC2的二分频器、无效像素计数器、无效行计数器、地址逻辑发生器、数据缓冲器等电路^[5]。

4.2 DSP存储器配置

将DSP配置为微计算机模式，即将处理器工作方式寄存器PMST中的MP/MC置0。将OVLY置1、DROM清零。根据C5416的存储器映射规则，此时外部64K的程序存储器分为高低32K通过相关逻辑分时被映射到内部数据区8000H~0FFFFH地址空间；而SARAM被映射到扩展的程序空间的2、3页，地址分别为28000H~2FFFFH和38000H~3FFFFH。系统上电后，以16位并行引导方式将程序导入DSP内部程序存储器SARAM中。程序引导完成后，将PMST中的DROM位置1，使得主程序访问数据区8000H~FFFFH地址空间时，只访问内部数据区而不会访问到外部FLASH。而将系统中的双口RAM扩展到程序空间的第4、5页高32K范围，地址为048000H~04FFFFH和058000H~05FFFFH处，利用MVPD指令将图像数据从程序空间转移到数据空间。DSP外部还挂接了一片64KB的SRAM，被映射到程序空间的第6、第7页高32K范围，地址为068000H~06FFFFH和078000H~07FFFFH用于存放图像处理过程中各种中间变量和数据。

图3为程序和数据存储器映射^[6]。

Hex	Page 0 程序空间	Hex	数据空间
0000	保留 (OVLY=1) 映射到外部 (OVLY=0)	0000	寄存器映射段
		005F	
		0060	
007F			片内 Scratch-pad RAM
0080	片内双存取 DARAM0-3 (OVLY=1) 映射到外部 (OVLY=0)	007F	
		0080	片内双存取 DARAM 0-3 32K*16 bits
7FFF		7FFF	
8000	映射到外部	8000	
BFFF			片内双存取 DARAM 4-7 (DROM=1) 映射到外部 (DROM=0)
C000	片内ROM 4K 16 bits		
FEFF			
FF00	保留		
FF7F			
FF80	片内中断向量		
FFFF		FFFF	

MP/MC=0
(微计算机模式)

图3 程序和数据存储器映射图

4.3 图像采集与处理

TMS320VC5416(以下简称VC5416)是TI公司推出的新一代的高性能16位定点数字信号处理器,它是整个图像采集处理系统的核心,完成从双口RAM中读取帧图像,然后应用图像处理算法对整幅图像进行处理并计算温度场及相关的参数。系统上电后先进行初始化,DSP通过16位并行引导方式从外部FLASH中将程序引导入片内程序存储器,并开始运行程序,利用DSP的McBSP多通道串口模拟I²C总线,将需要的控制字写入SAA7111A的寄存器,设置其工作模式之后,DSP发启动采集信号,同时等待采集完成的中断信号,CPLD在SAA7111A的HBEF, VBEF, BTS0, LLC2信号同时有效时,对其行、列信号进行计数,送出符合要求分辨率的图像信号,并产生双口RAM的地址、选通、写等逻辑信号,将图像写入双口RAM中,写完帧图像后发中断信号通知DSP读取,DSP执行中断服务程序,从双口RAM中将帧图像读入内部数据空间,随即进行相应的处理。

5 系统软件设计

软件设计时,要充分考虑锅炉安全运行对测量系统的实时性要求。在程序中,对燃烧的诊断为2级:(1)第1级为安全性诊断,即利用阈值法进行边缘检测,确定高温区的面积和平均温度,火焰中心位置,并进行安全性的判断;(2)第2级为燃烧状态评价,计算整个燃烧区的温度场,并绘制火焰等温线;提取燃烧特征参数包括图像特征区的平均温度及分布方差、火焰图像特征区高于平均温度的面积、煤粉未燃区的面积等。这些参数被送往上位机,与热工的其他参数,如过量空气系数、煤粉特性值一起,作为神经网络模型的输入来估计NO_x的生成量、计算燃烧的指数,对燃烧系统的状况进行评价,为燃烧控制提供依据。DSP程序中图像采集、键盘响应及与上位机通信均采用中断方式。系统程序全部用标准C语言写成,并在TI的CCS(Code Composer Studio Version2.0)集成开发环境中调试完成。DSP上主程序流程如图4所示。

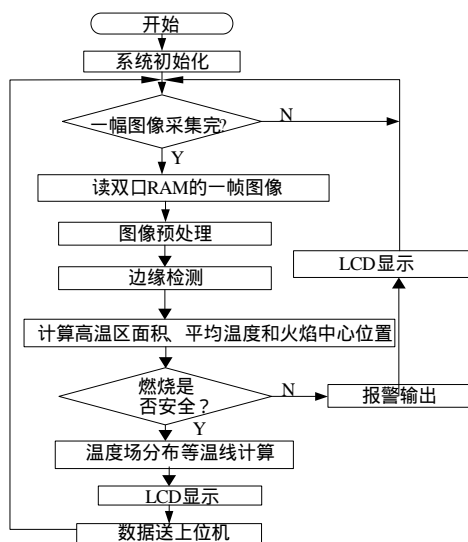


图4 主程序流程

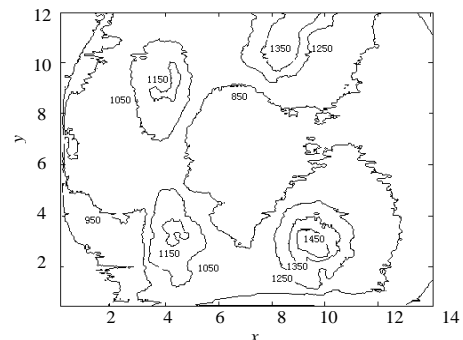
6 试验结果

利用本系统,对某电厂200MW机组锅炉进行了试验,试验前,首先通过黑体炉对系统进行标定,确定系数 $\frac{k_R k_B}{k_G^2}$,然后进行测量。图5(a)是实时监测到锅炉点火后的一幅油、

煤共燃图像。图5(b)是经过系统处理后的火焰分布特征图。可以看到火焰图像被有效地分隔为几个区域,图上标出的数字为系统计算的各区域的平均温度。由于图像采集时进行了压缩,系统的分辨率有所下降,测量温度场有一定的偏差,经过和高温双色温度计进行试验比对,其最大偏差不会超过50,相对误差小于5%,不会对燃烧诊断产生影响。系统能在一帧时间内完成一幅图像的处理与特征量的提取,在1s内完成锅炉燃烧状况的诊断。火焰特征的有效提取为火焰的燃烧诊断提供了可靠的数据。与原来采用的通用计算机加图像采集卡的结构相比,系统实时性得到了保证。



(a)



(b)

图5 实时监测的火焰图像

7 结束语

DSP在锅炉火焰监视与燃烧诊断系统中的应用,克服了以往图像火焰监视系统计算能力低下、实时性差的缺点,为复杂的运算和判别的实现以及进一步的燃烧诊断与指导锅炉运行提供了坚实的基础。目前本系统已在国产200MW火电机组上投入试运行,效果良好。实践证明,利用DSP技术开发图像火焰燃烧诊断系统对提高锅炉的安全性、经济性、减少对环境的污染有着重要的意义。

参考文献

- 1 王式民, 赵延军, 王凤林. 光学分层热成像法重建火焰三维温度场分布的研究[J]. 工程物理学报, 2002, 23(6): 233-236.
- 2 张玉杰, 吕 岑. 基于彩色CCD炉膛火焰温度场测量方法研究[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 674-678.
- 3 马增益. 锅炉传热磨损及火焰温度场在线测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- 4 Philips Semiconductors Corporation. SAA7111A Enhanced Video Input Processor Data Sheet[EB/OL]. 1998-05. <http://www.semiconductors.com>.
- 5 李 强, 陈善勇, 杨尚昱. 基于TMS320VC5416的机器视觉处理系统[J]. 电视技术, 2004, (7): 86-89.
- 6 TI Corporation. TMS320VC5416 Fixed-point Digital Signal Processor Data Manual[Z]. 2003-04.