

运用彩色 CCD 测量火焰温度场的 试验研究及误差分析

王 飞 薛 飞 马增益 卫成业 李晓东 严建华 倪明江 岑可法
(浙江大学)

[摘要] 电厂锅炉火焰的温度场分布对于电厂的安全运行和燃烧诊断都具有极其重要的现实意义。运用计算机图像处理技术测量燃烧火焰的温度场分布是近年来国内外得到较多研究的一项技术。文中采用彩色 CCD 摄像机对炉膛火焰进行温度场计算,并对计算方法的误差进行了详尽的分析。试验结果表明,此方法简便可行,具有投入工业现场应用的前景。

关键词 图像处理 温度场 CCD

中图法分类号 TK311

0 前言

高温火焰的温度场分布是燃烧领域内一个极其重要,但又比较复杂的问题。在工程应用方面,寻找一种简便、快捷的方法进行温度场的测量显得尤为重要。基于计算机图像处理的温度场测量方法是近年来在国内外得到较多研究的一项技术,根据彩色 CCD 摄像机的色度学基础,运用比色法的原理,可以进行燃烧火焰的温度场重建。这种方法不需要选取参考点,直接利用彩色 CCD 摄像机获取的火焰图像计算出温度场。本文首先对这种方法进行了介绍,着重对其可能产生的各种误差进行了分析,并给出了在电厂锅炉上的试验结果。初步结果表明,此方法简单准确,可以运用于电厂锅炉火焰的温度场测量和燃烧诊断。

1 温度场测量的基本原理

一个典型的彩色 CCD 摄像机测温系统如图 1 所示。

火焰的图像通过摄像机和图像卡后,以数字的形式储存在计算机内。系统中所用的摄像机——CCD (Charge Coupled Devices) 电荷耦合器件是一种 70 年代初发展起来的新型半导体器件,已经被越来越广泛地运用

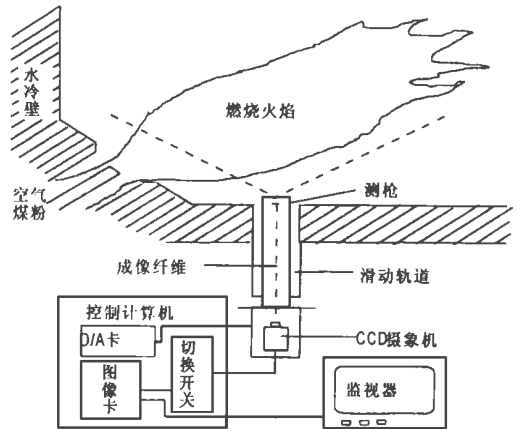


图 1 基于彩色 CCD 的计算机图像处理系统

到工业诊断和过程监视中。彩色 CCD 的任务就是把来自景物的入射光分解为波长分别为 700 nm、546.1 nm、435.8 nm 的红 (r)、绿 (g)、蓝 (b) 三基色。因而火焰图像在计算机内实际上是以 r、g、b 为波长的三色图像。利用其中的两个颜色的图像,根据比色法测温原理,就可以进行温度场计算。

在煤粉燃烧火焰辐射的波长范围 400 nm 到 750 nm 及温度范围 3000K 以下, Planck 辐射定律可由维恩辐射定律取代^[2]:

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

式中, $E(T)$ 为火焰辐射能, $X(\lambda, T)$ 为辐射率, λ 为波长, C_1 和 C_2 为常数 如果在两个波长 λ_1 和 λ_2 下若同时测量到同一点发出的单色辐射能 $E_1(T)$ 和 $E_2(T)$, 则根据两者的比值即可计算出该点的温度:

$$T = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})}{\ln \frac{E_1(T)}{E_2(T)} - \ln(\frac{X_1}{X_2}) - 5 \ln(\frac{\lambda_2}{\lambda_1})} \quad (2)$$

在彩色 CCD 获取的三色火焰图像中, 我们任意选取其中两个颜色的图像, 即可利用式 (2) 计算出温度场 在下面的叙述中, 我们将用蓝色和红色绿色和红色 蓝色和绿色计算温度而分别记为 T_{br} , T_{gr} 和 T_{bg} , 并对三种方法进行分析比较

2 误差分析及校正

2.1 修正由光强代替辐射能引入的误差

在运用图像处理技术进行温度场的测量计算中, 通常是将由 CCD 获取的光强值来代替辐射能 一般认为, 火焰的光强与辐射能成正比, 因此两种波长下的辐射能之比可以由光强之比来代替 但是, 考虑到在从火焰本身到摄像机的光路系统中辐射能的流失和衰减, 在将光强之比来代替辐射能之比时, 还需引入一个由 r, g, b 亮度确定的修正系数 $h(L_r, L_g, L_b)$, 即:

$$\frac{E_1(T)}{E_2(T)} = h(L_r, L_g, L_b) \frac{L_{\lambda_1}}{L_{\lambda_2}} \quad (3)$$

其中, $E_1(T)$, $E_2(T)$ 为两种波长下的辐射能, L_{λ_1} , L_{λ_2} 为两种波长的光强, $h(L_r, L_g, L_b)$ 是根据标准黑体炉标定的修正系数, 由 r, g, b 亮度值和具体光路系统确定

2.2 火焰黑度引起的误差

在测温公式 (2) 中, $\ln(\frac{X_1}{X_2})$ 一项是由于不同波长下辐射率变化而引起的. 当选取的比色波长 λ_1 和 λ_2 比较接近时, 可以认为 $X_1 \approx X_2$, 即 $\ln(\frac{X_1}{X_2}) \approx 0$ 测量计算中, 我们就是采取这样的假设来处理的.

但是, 实际火焰在不同波长下的辐射率 X_1 和 X_2 并不相近, 由此造成的误差可用下式表示

$$\Delta T = T \left[\frac{C_2(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2})}{T \ln \frac{X_1}{X_2} + C_2(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2})} - 1 \right] \quad (4)$$

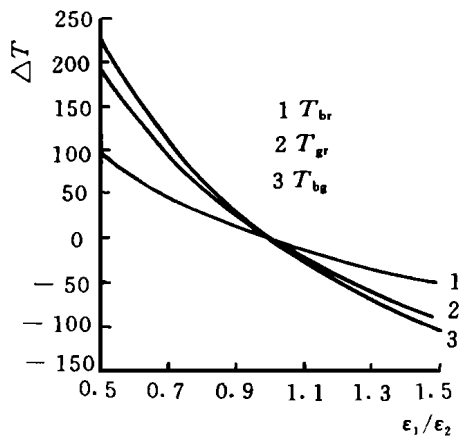


图 2 1273K 时误差分析

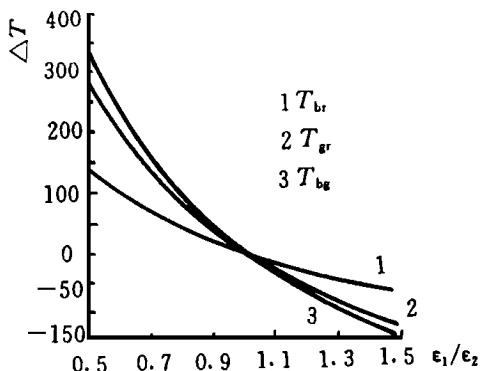


图 3 1523K 时误差分析

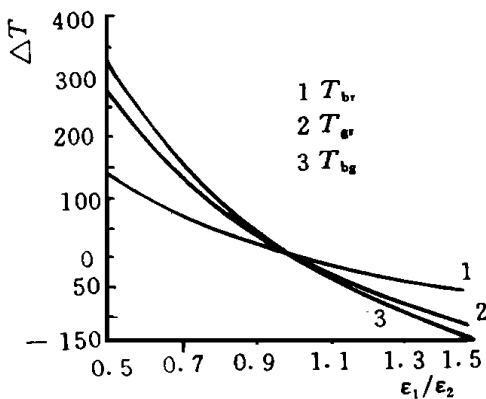


图 4 1773K 时误差分析

由式 (4) 可以看出, 误差的大小与 λ_1, λ_2

的选取和 X_1/X_2 的值有密切的关系

CCD 所获得的火焰图像有三个波长下的亮度值, 因此选取哪两个波长进行测温对计算有着直接的影响。图 2 3 4 比较了在 1273K 1523K 1773K 时, T_{br} , T_{gr} 和 T_{bg} 的测量误差, 横坐标为两种波长下火焰辐射率的比值, 由图 2 3 4 可以看出:

- (1) 系统误差随辐射率比值的增大而呈指数形式减小。
- (2) 根据蓝色和红色亮度值计算出的温度 (T_{br}) 误差最小
- (3) 当火焰在两种波长下的辐射率比值介于 0.9~ 1.3 的范围内时, 若计算温度为 1500°C (1773K), 则测量误差在正负 100 度以下。实际火焰的辐射率比值基本上都可视为在这一范围内

(4) 火焰温度越低, 误差越小。在煤粉炉常见的 1000~ 1300°C 的范围内, T_{br} 的误差并不超过正负 50 度

(5) 根据以上分析可知, 选用蓝色和红色图像计算出的温度场, 其由于火焰的辐射率随波长不同而变化所造成的误差最小

2.3 CCD 摄像器件在测量中产生的误差

在温度场的计算中, 假定系统是无畸变和无噪声的线性空间不变系统, 即入射光强 I 与图像板中对像点的数据 D 有以下的简单线性关系:

$$D = K \cdot I$$

并且比例因子 K 值与输入能量分布形式和位置无关。但实际系统各环节存在着畸变和噪声, 也不完全符合线性和空间不变性的要求, 因而图像卡中各点的数据并不能正确反映入射的光强, 从而使计算出来的温度场存在着一定的误差

由于 CCD 摄像机系统造成的误差主要包括:

2.3.1 CCD 探测器光电响应不均匀性

光电响应的不均匀性是由于 CCD 面阵成像器件各光敏元响应的不一致造成的。不均匀性导致每一像元的响应度不同, 使得在均匀光照下各个光敏元输出信号不相等, 必然使能量分布的探测失真, 因此必须加以补偿和校正。选择适当的校正因子可以校正这一项误差

2.3.2 CCD 探测器光电响应非线性

理想探测器在动态范围内的输出电压 V (或电流 I) 应与输入曝光量成正比:

$$V = K \cdot E$$

实际器件一般不满足上述关系, 如图 5 所示

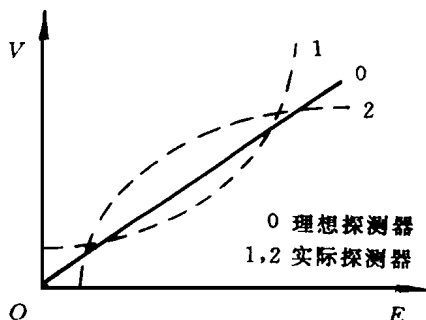


图 5 实际器件的光电响应曲线

显而易见, 光电响应非线性也将使探测到的能量分布失真, 必须加以校正。校正方法一般为用查表变换法

2.3.3 CCD 摄像机的制式转换

为了满足电视信号的要求, 摄像机电路需将 CCD 一行所有有效光敏元产生的离散信号按一定的时钟速率读出, 进行平滑处理形成一行电视信号。后续的图像卡又将一行电视信号重新采样, 形成离散 → 平滑 → 离散的过程。图像卡采样的像素点与探测器的光敏元没有确定的对应关系, 这必然使探测到的能量分布失真。校正的办法是产生适当的时序使 CCD 输出信号不经平滑处理直接按像元做 A/D 变换, 并存入图像卡

2.3.4 CCD 摄像机的自动增益控制 (AGC)

AGC 电路是电视摄像机为了增大摄像动态范围, 不使输出电视信号太强或太弱的一种典型方法。其本质是当输入靶面照度较低时, CCD 响应信号较弱, AGC 电路自动将增益加大, 使最终输出信号不致太低; 反之若靶面照度较高时, AGC 电路自动降低增益, 使输出信号不致太强。AGC 对普通电视摄像机来说是优点, 但对测量来说是决不允许的, 因为它将使输入输出关系不确定, 使所采集的数据不可信

对一般的 CCD 摄像机而言, 只要将 AGC

的开关打到 OFF即可消除 AGC的影响。

2.3.5 CCD摄像机的 V校正

电视摄像机中的 V校正电路是为了补偿人眼对光强响应的非线性而设计的,其含义是使输出信号 V与输入光强 I的关系不再是线性而是指数规律:

$$V = K \times I^V$$

显然对于能量分布测量来讲, $V \neq 1.0$ 时,这又是一个显著的非线性缺陷的来源

在测量时,使 $V = 1.0$ 即可校正以上误差。

3 在电站锅炉上的测量结果

各项误差予以校正后,在某电厂的锅炉内进行了火焰的温度测量试验。为了防止高亮度的火焰造成彩色图像的饱和失真,在光

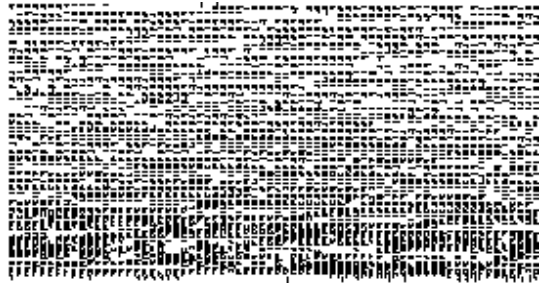


图 6 炉膛燃烧火焰

学成像系统的前端加装了高衰减率的中性滤色片。彩色 CCD获得的图像被送入 CA6300 图像卡进行数字化处理后,直接显示在图像监视器上,并送入计算机进行温度场计算。结果如图 6 7 8所示(由于绘图软件的关系,图 6和图 7,图 8的坐标不一致。)

4 结论

基于彩色 CCD摄像机的色度学原理,选择获取的蓝色和红色图像,根据比色测温方法,可以计算火焰温度场。此方法无需参考点,可以方便、快捷地应用到工业现场。在电

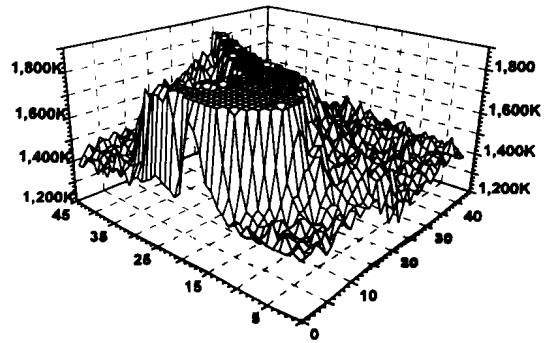


图 7 温度场分布

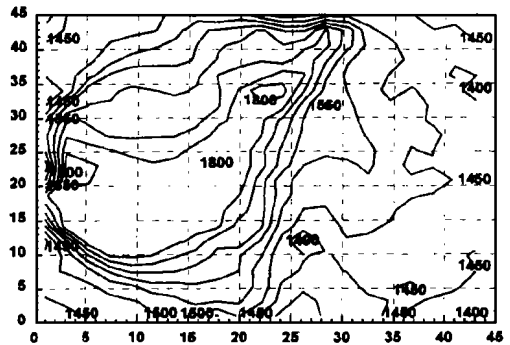


图 8 温度等值线

厂锅炉的试验研究表明,这种方法具有较高的精度,可以应用于火焰的燃烧诊断和分析,并为进一步的温度场三维重建奠定了基础。

参考文献

- 1 Shimoda M, et al. Prediction method of unburnt Carbon for coal fired utility boiler using image processing technique of combustion flame. IEEE Transaction on Energy Conversion. 1990, 5(4): 640~ 645
- 2 庞长富,刘榴娣. CCD摄像机用于测量中存在的问题及解决办法. 光学技术, 1996, 3(2): 5~ 8
- 3 吕维雪编. 医学图像处理. 北京: 高等教育出版社. 1989
- 4 周怀春等. 火焰温度场图像处理试验研究. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 295~ 300
- 5 周怀春等. 基于辐射图像处理的炉膛燃烧三维温度分布检测原理及分析. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 1~ 4

作者简介: 王飞 男 1972年生 博士研究生,现在浙江大学热能工程研究所攻读硕博一贯制。(通讯处: 310027 杭州: 浙江大学热能工程研究所)

运用彩色 CCD 测量火焰温度场的试验研究及误差分析 = **An Experimental Study of Flame Temperature Field Measurement By the Use of a Colored CCD Camera and Its Error Analysis** [刊, 中] / Wang Fei, Xue Fei, Ma Zengyi, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 81~ 84

The flame temperature field distribution in a power plant boiler plays a very significant role in ensuring the safe operation of the power station and achieving a correct diagnosis of the boiler combustion conditions. The use of computer-based image processing techniques has in recent years been accorded great attention in the study both at home and abroad of combustion flame temperature field measurements. The present paper deals with the calculation of a furnace flame temperature field by using a colored CCD camera with a detailed analysis of the calculation error under this method being given. The test results show that the proposed method features ease of application with good prospects for its use on work-sites. Key words image processing, temperature field, CCD

改进型 UP 锅炉水冷壁管热敏感性的研究 = **A Study of the Thermal Sensitivity of a Modified UP Boiler Water Wall Tubes** [刊, 中] / Tian Pu, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 85~ 87

In the light of the commonly encountered water wall tube explosion leakage of home-made modified UP boilers an analysis is made of the thermal sensitivity of $\Phi 22 \times 5.5$ mm four-head internally ribbed tubes commonly used in UP boilers. Various factors affecting the degree of sensitivity are calculated from a multitude of variables, including dryness, thermal load, tube section height, inlet and outlet local resistance, etc. Also discussed is the influence of thermal sensitivity on the operation of boilers with some proposals for the boiler design and operation being given. Key words UP boiler, water wall, internally ribbed tubes of water wall, thermal sensitivity

循环流化床烟气脱硫技术及其实验研究 = **Circulating Fluidized Bed Flue Gas Desulfurization Technology and Its Experimental Study** [刊, 中] / Huang Zhen, Wu Yinghai, Wang Wenliang (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 88~ 90

Presented in this paper are the specific features of several kinds of flue gas desulfurization technology. A desulfurization test study is conducted on a variable-speed circulating fluidized bed through the use of dry slaked lime powder as a desulfurizing agent. Under the condition of Ca/S ratio being 1.1 and the injection of a proper quantity of water a desulfurization rate of above 85% can be attained. Key words circulating fluidized bed, desulfurization, flue gas desulfurization, desulfurization efficiency

角管式蒸汽锅炉再循环管的实验研究 = **An Experimental Study of Corner-Tube Steam Boilers** [刊, 中] / Meng Zhaopeng, Lu Wei, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 91~ 95

Through an analysis of the circulation principle of a corner-tube steam boiler side wall water wall tubes the authors have identified the major factors affecting the hydrodynamic characteristics of circulating tubes and set up a test rig for the study of their hydrodynamic characteristics. An experimental study is also performed of the mechanism of influence of thermal load