

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0261-06

基于灰度反演的光学双色成像测温方法

吴永华 蒋 斐 胡以华 闫 飞 雷武虎

(脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

摘要 光学测温技术是当前工业燃烧领域进行火焰监测和燃烧诊断的研究热点。提出了一种基于灰度反演的光学双色成像测温方法,给出了测温系统的原理设计框图,推导了基于灰度反演的测温算法。分析得出,相比三基色测温法,该测温方案消除了火焰的灰性假设和光谱响应带宽非理想性的影响,克服了红绿蓝(RGB)三通道非线性输出和可见光处辐射所占能量份额少的弊端。研究表明,该方法测温精度高,较好地反映了炉内火焰的二维温度分布情况,可为火焰监测和燃烧诊断提供指导,具有广阔的应用前景。

关键词 光学检测;双色成像测温;灰度反演;燃烧诊断

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0261

Temperature Measurement Method of Optical Double-Color Imaging Based on Grayscale Inversion

Wu Yonghua Jiang Fei Hu Yihua Yan Fei Lei Wuhu

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute),
Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract Optical thermometry is a research hotspot in current industrial combustion fields for flame monitoring and combustion diagnostics. A new temperature measurement method of optical double-color imaging based on grayscale inversion has been proposed. The functional block diagram of temperature measurement system has been given and the temperature measurement algorithm based on grayscale inversion has also been deduced. The analysis has demonstrated that, compared with the three-color thermometry, this thermometry has eliminated the negative effects of flame's gray body hypothesis and non-ideal spectral responsive bandwidth, and overcome the drawbacks of nonlinear three-channel output and few energy share occupied by solar visible radiation. The research has shown that, this method has high temperature measurement accuracy, and can measure the 2D-temperature distribution of boiler flame. It can provide the good instruction for flame detection and combustion diagnosis, which will be widely used in future.

Key words optical inspection; temperature measurement based on double-color imaging; grayscale inversion; combustion diagnostics

1 引 言

实现火焰温度场的测量是当前电站锅炉、水泥生产窑等工业燃烧领域进行火焰监测和燃烧诊断的关键^[1]。由于 CCD 摄像系统输出的图像信号与输入的光信号间具有明确关系,这种关系使得利用火焰的辐射信号进行温度场测量成为可行^[2]。近年

来,国内外大量学者在研究利用 CCD 摄像机检测火焰温度方面取得了很大的进展。

日本的日立公司很早便开始了运用可见光检测火焰的研究,研制了火焰图像的锅炉燃烧监视系统,来实时监测和诊断火焰温度^[3];浙江大学薛飞等^[4]基于彩色 CCD 利用红绿蓝(RGB)三基色信号计算出

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-30

作者简介: 吴永华(1986—),男,硕士研究生,主要从事光电信息处理技术方面的研究。

E-mail: wuyonghua2010@126.com

导师简介: 胡以华(1962—),男,博士,教授,主要从事航天信息处理方面的研究。E-mail: yh_hu@263.net

火焰二维温度场;上海交通大学的徐伟勇等^[5]开发了用于反映炉内燃烧状态和稳定性的图像处理系统,并用于电厂锅炉现场测温;华中科技大学贾涛等^[6]提出了彩色 CCD 三色测温法的修正办法,提高系统的测温精度。目前,基于彩色 CCD 摄像机的三基色测温法发展已比较成熟,已用于工业炉膛的现场测温。

然而,上述的 RGB 三色测温法存在着诸多不足,本文在阐述其测温原理的基础上,分析了其误差产生原因,并提出了一种新的基于灰度反演的光学双色成像测温方法。给出了测温系统的设计框图,推导了基于灰度反演的灰度算法,并进行了初步验证。

2 RGB 三色测温法的原理和误差分析

2.1 测温算法的原理

彩色 CCD 三色测温法的基本原理是^[7]:火焰辐射通过光学系统传输到 CCD 靶面上进行光电转换,将火焰温度分布转换成火焰图像的亮度分布;然后计算机处理提取图像中 RGB 三基色值,其对应着火焰在三基色代表性波长(700, 546.1 和 435.8 nm)下的单色辐射能量;最后,基于维恩位移定律和比色测温原理推导出的三色测温公式,计算出火焰的温度分布。测温公式可简单推导如下^[8]。

接收火焰辐射后,彩色摄像机输出三刺激值为

$$\begin{cases} V_R = K_R \int_{380}^{780} M_{\lambda T} S_R(\lambda) d\lambda \\ V_G = K_G \int_{380}^{780} M_{\lambda T} S_G(\lambda) d\lambda \\ V_B = K_B \int_{380}^{780} M_{\lambda T} S_B(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中 $M_{\lambda T}$ 为火焰的光谱辐射出射度; K_{RGB} 为 RGB 三通道的增益系数; $S_{RGB}(\lambda)$ 为三通道的光谱响应特性,若做窄带宽的理想假设,则(1)式可简化为

$$\begin{cases} L_{\lambda_R}(T) = \epsilon_{\lambda_R} K_{\lambda_R} S_{\lambda_R} c_1 \lambda_R^{-5} \exp[-c_2/(\lambda_R T)] \\ L_{\lambda_G}(T) = \epsilon_{\lambda_G} K_{\lambda_G} S_{\lambda_G} c_1 \lambda_G^{-5} \exp[-c_2/(\lambda_G T)] \\ L_{\lambda_B}(T) = \epsilon_{\lambda_B} K_{\lambda_B} S_{\lambda_B} c_1 \lambda_B^{-5} \exp[-c_2/(\lambda_B T)] \end{cases} \quad (2)$$

式中 $L_{\lambda_R}(T), L_{\lambda_G}(T), L_{\lambda_B}(T)$ 分别为 RGB 三波长处的光谱辐射亮度, $\epsilon_{\lambda_R}, \epsilon_{\lambda_G}, \epsilon_{\lambda_B}$ 分别为 RGB 三通道的光谱发射率,辐射常数 $c_1 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$, 辐射常数 $c_2 = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。此处,选择绿色光为共有项波长(即 2G 法),对(2)式求比值后再两边取对数,整理可得

$T =$

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right)}{\ln \frac{L_{\lambda_R}(T) L_{\lambda_B}(T)}{L_{\lambda_G}^2(T)} - 5 \ln \frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_G^2} - \ln \frac{S_{\lambda_R} S_{\lambda_B}}{S_{\lambda_G}^2} - \ln \frac{\epsilon_{\lambda_R} \epsilon_{\lambda_B}}{\epsilon_{\lambda_G}^2}} \quad (3)$$

若将火焰近似为灰体,则 RGB 三波长处的光谱发射率相等。(3)式可最终简化为

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right)}{\ln \frac{L_{\lambda_R}(T) L_{\lambda_B}(T)}{L_{\lambda_G}^2(T)} - 5 \ln \frac{\lambda_R \lambda_B}{\lambda_G^2} - \ln \frac{S_{\lambda_R} S_{\lambda_B}}{S_{\lambda_G}^2}} \quad (4)$$

(4)式即为 RGB 三色法测温的理论基础。

2.2 测温误差的分析

在利用三色测温计算公式测量真实火焰的温度时往往会出现很大的测温误差。下面就对产生这些误差的主要原因逐一进行分析。

1) 可见光辐射占总辐射份额相对较少

分析图 1 发现,温度在 [600 K, 2000 K] 内的炉膛辐射峰值波长通常为 [1.4494 μm , 4.8313 μm]。但 RGB 三波长远离该峰值辐射区间,其所占能量份额相对很少,极易受到噪声辐射的干扰,因而测温精度会在很大程度受影响。

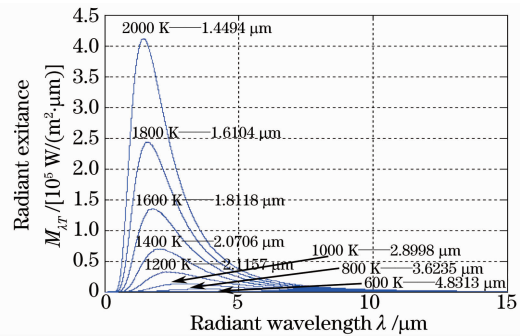


图 1 不同温度下黑体光谱辐射出射度曲线

Fig. 1 Spectral radiant exitance curves of blackbody at different temperatures

2) 忽略 RGB 三波长处的发射率差异

由于火焰辐射并非理想中的灰体,(4)式中忽略 RGB 三基色波长处的发射率差异(假设 $S = \epsilon_{\lambda_R} \epsilon_{\lambda_B} / \epsilon_{\lambda_G}^2 = 1$)必然会导致测温误差

$$\Delta T = T_{\text{ture}} - T_{\text{measure}} =$$

$$T_{\text{ture}} \left[\frac{c_2 \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right)}{T_{\text{ture}} \ln \frac{\epsilon_{\lambda_R} \epsilon_{\lambda_B}}{\epsilon_{\lambda_G}^2} - c_2 \left(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B} \right)} + 1 \right] \quad (5)$$

图 2 表明,随着发射率比值 S 的不同,测温误差

ΔT 将在相应区间内变化,并且所测温度越高,其误差的变化区间越大。

3)RGB 三通道的非线性

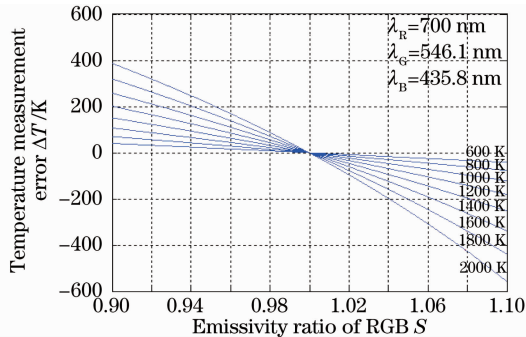


图 2 不同温度下发射率差异引起的测温误差

Fig. 2 Temperature measurement error caused by emissivity variance at different temperatures

从图 3 可看出,CCD 输出的 RGB 三刺激值并非如(1)式中的线性关系,而是如(2)式所示。此处的简化,必会引入较大的测温误差^[9]。

4)RGB 三通道的光谱响应带宽非理想性

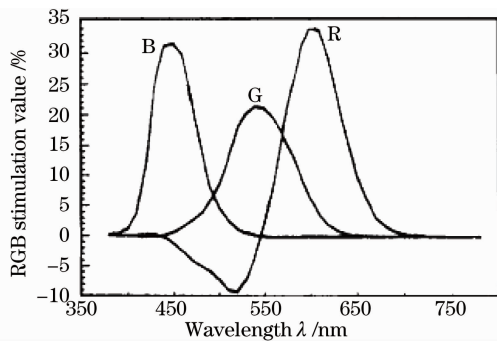


图 3 1931CIE-rgb 系统光谱三刺激值曲线

Fig. 3 Spectral three stimulation curves of 1931 CIE-rgb system

图 4 中,CCD 对 RGB 三波长处的响应并非理想的冲击函数,而是具有一定带宽的。此处忽略该带宽的存在,仅考虑 RGB 各自代表波长处的响应灵

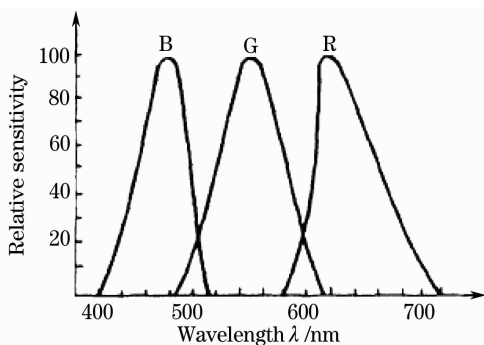


图 4 彩色 CCD 摄像机的光谱响应特性曲线

Fig. 4 Spectral response curves of color CCD camera

敏度,必会导致最终所测温度高于实际温度。

由于基于彩色 CCD 的 RGB 三色测温法存在上述严重影响测温精度的弊端。为提高测温精度,满足工业上火焰监测和燃烧诊断的需要,提出了一种基于灰度反演的光学双色成像的温度检测方案。

3 基于灰度反演的光学双色成像测温法

3.1 测温系统的设计

图 5 为设计的测温系统的原理框图,主要由光学系统、双色成像系统、视频采集单元、计算机图像处理

处理和温度显示单元等 4 部分组成。其中光学系统为内窥式的光学潜望镜,主要由传像光纤、光纤高温探头、高温透镜、分光镜构成。其通过高温透镜和高温探头获取的炉内火焰图像,经光纤引出至分光镜处被分成两束光后,进入 CCD 双色成像系统。该成像系统由两块窄带滤光片和两个红外 CCD 摄像机配套构成。两滤光片只通过各自允许的通透波长处的火焰单色辐射能。其后方的两 CCD 靶面则将通过的能量转化为两幅单色辐射热图像。

通常,两滤光片的中心波长 λ_1 和 λ_2 需要根据测温要求进行选定,半峰全宽 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 越窄越好^[10,11]。此外,由于测温计算需要同一火焰的两幅不同波长处的单色辐射图像,这就要求两摄像机所处位置必须合适,使得拍摄图像上的像素点能够完全重合。因而,该系统中设计利用图像配准生成的误差信号来反馈调节两摄像机的位置,进而使得拍摄的两幅单色辐射图像完全吻合。

成像后的 CCD 将火焰图像的视频信号传输至视频采集卡处并转换为便于后续计算机处理的二维数据信号。计算机图像处理和温度显示单元主要是针对输入的火焰的数字图像信号,先进行图像去噪和图像配准的处理;后再基于公式计算火焰面上各点处的温度,并以伪彩色或等值线形式显示出来,作为后续火焰燃烧诊断的依据。

3.2 测温算法的推导

基于系统的设计原理,推导了一种新的测温算法,通过双色辐射图像的灰度来反演火焰的温度场分布。算法的推导流程如下。

由于火焰面上的所有物点 (i, j) 与图像上的像点 (i', j') 间均满足一一对应关系,经过系统的工作流程后,物点 (i, j) 处的温度 T 最终被转换为像点

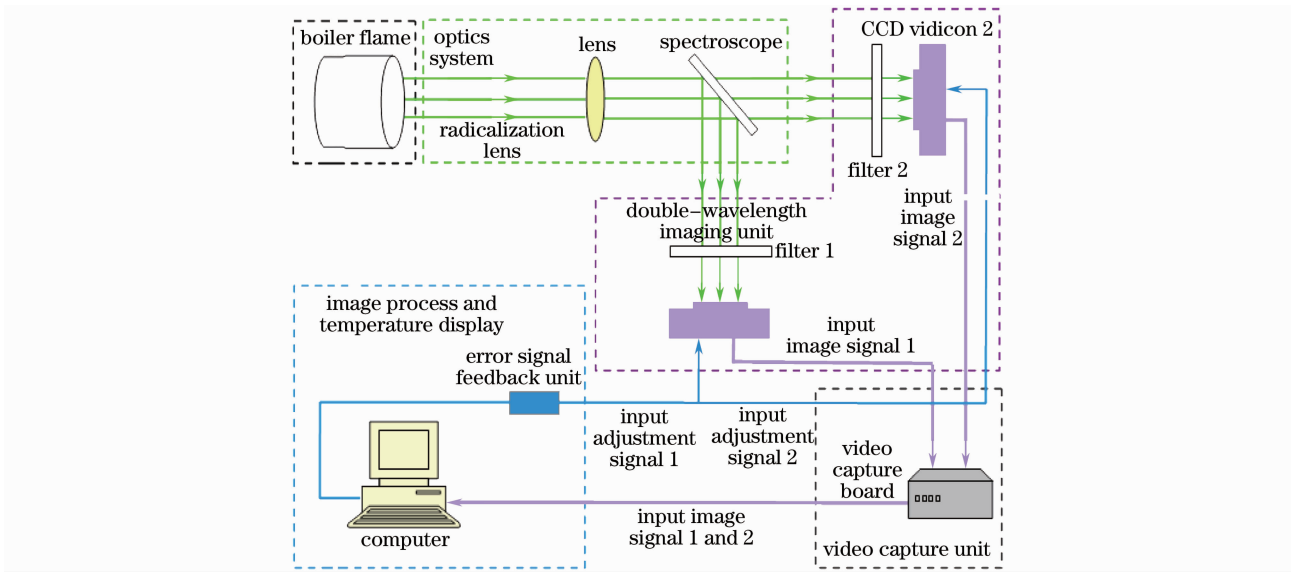


图 5 测温系统的原理框图

Fig. 5 Functional block diagram of temperature measurement system

(i', j') 处的灰度 G , 并且此转换关系是确定可知的。因而, 基于这种关系的逆向推导, 便可以从图像的灰度值反演出火焰的温度值^[12]。温度与灰度间的转化流程如图 6 所示。

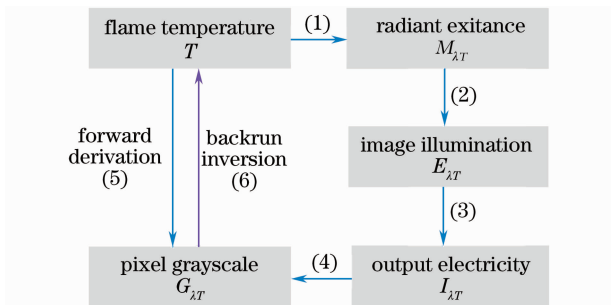


图 6 火焰的辐射温度与图像灰度间的转换流程

Fig. 6 Transformation process of flame radiometric temperature and flame image gray

图 6 中, T 为高温火焰面上某物点 (i, j) 的温度值, $M_{\lambda T}$ 为该物点处光谱辐射出射度, $E_{\lambda T}$ 为 CCD 摄像机靶面上相应像素点 (i', j') 的照度, $I_{\lambda T}$ 为该像素点的输出电流, $G_{\lambda T}$ 为视频图像上该像素点的灰度值。(5) 为从温度到灰度的正向推导过程, (6) 为从灰度到温度的逆向反演过程。

在温度小于 3000 K 时, 根据维恩位移定律, 火焰面上温度为 T 的物点 (i, j) 处在 λ 波长上的辐射出射度为

$$M_{\lambda T} = \epsilon_{\lambda T} \frac{c_1}{\lambda^5} \exp[-c_2/(\lambda T)], \quad (6)$$

式中 $c_1 = 3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$, $c_2 = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m}^4 \cdot \text{K}$ 。

当物距远大于镜头焦距时, 像点 (i, j) 的照度 $E_{\lambda T}$ 可表示为

$$E_{\lambda T} = \frac{1}{4} \tau_0 M_{\lambda T} \left(\frac{D}{f'}\right)^2, \quad (7)$$

式中 τ_0 为光学系统透射率, D 为入射光瞳直径, f' 为像方焦距。

由于 CCD 器件是积分型器件, 它输出的电流信号不仅和光敏面上照度有关, 还和曝光时间 t 有关, 可表示为

$$I_{\lambda T} = S_{\lambda} E_{\lambda T} t, \quad (8)$$

式中 S_{λ} 为摄像机的光电转换系数, $E_{\lambda T} t$ 为曝光量。此外, 为满足显示图像要求, 通常摄像机会引入的校正系数 γ , 常见 γ 取值有 0.2, 0.45 和 1.0, 这里取值 1.0, 以保证 (8) 式的线性关系成立。

此外, 视频图像灰度与 CCD 输出电流间的关系为

$$G_{\lambda T} = K I_{\lambda T}, \quad (9)$$

式中 K 为灰度与电流间的转换关系。

最后, 综合 (1)~(4) 式, 图像上像点灰度与火焰面上物点温度间的关系式为

$$G_{\lambda T} = \frac{1}{4} K S_{\lambda} \tau_0 t \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{c_1 \epsilon_{\lambda T}}{\lambda^5 \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}. \quad (10)$$

基于比色测温法的基本原理, 选择两个测温波长 λ_1 和 λ_2 , 并对 (10) 式两边求比值后再取对数, 可得温度反演结果为

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{\ln \frac{G_{\lambda_1 T}}{G_{\lambda_2 T}} - \ln \frac{\epsilon_{\lambda_1 T}}{\epsilon_{\lambda_2 T}} - 5 \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) - \ln \frac{K S_{\lambda_1} \tau_0 t}{K' S_{\lambda_2} \tau_0 t}}, \quad (11)$$

式中令 $Q = (KS_{\lambda_1} \tau_0 t) / (K'S_{\lambda_2} \tau'_0 t')$, 其值可通过黑体标定得到; 波长 λ_1 和 λ_2 可通过理论计算分析, 选择较为接近的值以使得 $\epsilon_{\lambda_1 T}$ 和 $\epsilon_{\lambda_2 T}$ 相等, 从而避免对于被测火焰的灰性假设。因而, (11) 式可进一步简化为

$$T = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{G_{\lambda_1 T}}{G_{\lambda_2 T}} - 5 \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) - \ln Q}, \quad (12)$$

即为该光学双色成像测温系统的理论基础。

3.3 测温精度的改善

由于设计的测温系统中采用了近红外 CCD 摄像机和单色滤光片, 因此可在 $[0.78 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m}]$ 上选择两个发射率相等的测温波长, 从而克服三色法测温中发射率差异的弊端。而此波段恰为火焰温度在 $[1000 \text{ K}, 3000 \text{ K}]$ 内所对应的峰值辐射波段, 所以, 较多的辐射能量进入成像系统也在一定意义上保证了测温精度, 避免了三色测温法中因可见光处辐射所占份额少而致使测温误差较大的缺陷。此外, 摄像机前添加了带宽极窄的滤光片, 致使进入 CCD 靶面上的仅为单一波长处的火焰辐射。此举提高了火焰图像的单色性精度, 解决了三色测温法中光谱响应带宽非理想性的难题。

4 测温方法的验证

为验证测温方法的可行性和测得温度的精确性, 针对某锅炉的燃烧火焰进行了温度测量。基于拍摄的锅炉火焰图像, 应用 3 节的测温公式进行温度计算并完成误差校正处理后, 便可得到如图 7, 8 所示的火焰温度场的伪彩色显示和等温线显示。鉴于人眼分辨灰度等级较低, 但识别彩色等级却很高的缘故, 应用图像处理技术, 用不同的颜色表征不同的温度区, 并且在等温线上标识相应的温度数值, 以增强视觉效果。

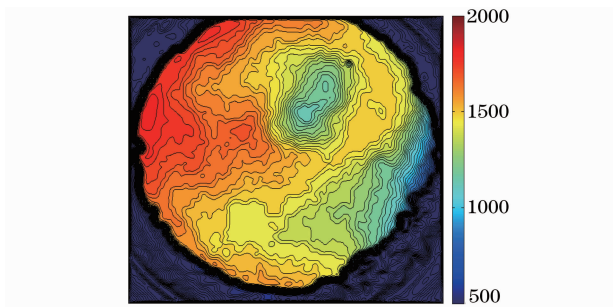


图 7 火焰温度场的伪彩色显示

Fig. 7 Pseudo-color display of flame temperature field

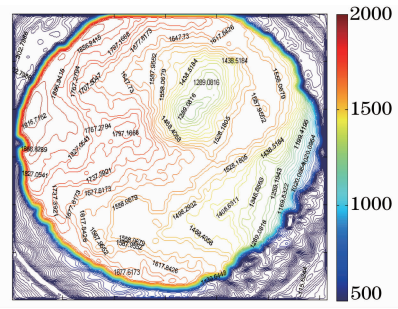


图 8 火焰温度场的等温线显示

Fig. 8 Isothermal display of flame temperature field

分析图 7, 8 可发现, 测得的火焰温度在 $1000 \sim 2000 \text{ K}$ 范围内变化, 并且变化较为连续, 与实际情况比较吻合。此外, 通过对比火焰面上的测温结果, 证实了基于灰度反演的光学双色成像测温法具有较高的温度测量精度, 能够真实地反映炉内火焰的二维截面上的温度分布情况, 其对于后续的燃烧诊断具有较强的指导性。

5 结 论

基于彩色 CCD 三色测温法的不足, 提出了一种基于灰度反演的光学双色成像测温系统的设计方法, 给出了系统测温的原理框图, 探讨了基于灰度反演的测温算法。初步的锅炉火焰温度检测实验表明该系统能够有效地检测出火焰面的温度分布, 可为火焰诊断提供准确的指导。

然而, 系统设计上仍存在需要进一步改进的地方。由于炉内火焰实际呈现三维立体分布, 但系统所测的温度二维分布截面仅是炉内火焰的三维温度场在成像方向上的投影结果, 而非真实存在的火焰温度截面, 因此无法给锅炉火焰监测和燃烧诊断提供更为精确丰富的指导信息。这一点将是后续研究中亟待解决的难点问题。但是随着基于灰度反演的光学双色成像测温技术的日臻完善, 其必将会广泛地应用在今后的工业测温领域。

参 考 文 献

- 1 Lou Chun, Han Shudong, Liu Hao *et al.*. A new model of radiative image formation for flames of pulverized-coal combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, **23**(suppl): 93~96
 娄春, 韩曙东, 刘浩等. 一种煤粉燃烧火焰辐射成像新模型 [J]. *工程热物理学报*, 2002, **23**(增刊): 93~96
- 2 Li Zhihong, Mu Huaiping, Jiang Fan *et al.*. The calibration and experiment research of multiple wavelength visual method flame temperature instrumentation system [J]. *Acta Meirologica Sinica*, 2007, **28**(2): 129~132
 李志宏, 穆怀萍, 姜凡等. 多波长可视化测温系统标定的实验研究 [J]. *计量学报*, 2007, **28**(2): 129~132

- 3 Kong Chen, Sun Jian. Application of the linear gray level transformation method in infrared temperature measurement system[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(8): 465~468
孔琛, 孙坚. 线性灰度变换算法在红外测温系统中应用[J]. *红外技术*, 2008, **30**(8): 465~468
- 4 Xue Fei, Li Xiaodong, Ni Mingjiang *et al.*. Research on temperature field measurement for combustion flame based on plane surface array CCD[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1999, **19**(1): 39~41
薛飞, 李晓东, 倪明江等. 基于面阵 CCD 的火焰温度场测量方法的研究[J]. *中国电机工程学报*, 1999, **19**(1): 39~41
- 5 Xu Weiyong, Yu Yuefeng, Zhang Yinqiao. The detection of burner flame based on image optical fiber and digital image processing[J]. *Power Engineering*, 1999, **19**(1): 45~48
徐伟勇, 余岳峰, 张银桥. 采用传像光纤和数字图像处理技术检测燃烧火焰[J]. *动力工程*, 1999, **19**(1): 45~48
- 6 Jia Tao, Cheng Qiang, Han Shudong *et al.*. Calibration method of a flame radiation image probe[J]. *Thermal Power Generation*, 2002, (5): 23~25
贾涛, 程强, 韩曙东等. 一种火焰辐射图像探头的标定方法[J]. *热力发电*, 2002, (5): 23~25
- 7 Zhang Yujie, Lü Cen. Study on measurement method of flame temperature field in hearth based on color CCD[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(5): 674~678
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
- 8 Xia Shouzhi, Guo Yan. Research on the measuring precision of the flame temperature field using CCD[J]. *J. Wuhan Inst. Tech.*, 2008, **30**(3): 118~121
夏守之, 郭焱. 应用 CCD 测量火焰温度精度问题的研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2008, **30**(3): 118~121
- 9 K. R. Allred, M. A. Manzardo, D. R. Anderson. Infrared scene projector characterization and sparse array nonuniformity correction[C]. *SPIE*, 2001, **3697**: 45~56
- 10 Zhang Yueguang, Wang Ying, Sun Xuezheng. Design and fabrication of short-wave/long-wave infrared dichroic splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 597~601
章岳光, 王颖, 孙雪铮. 红外短波/长波分色片的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 597~601
- 11 Xin Jun, Feng Qibo, Lin Tiesheng. Wavelength optimization of a high precision noncontact dual-wavelength fiber-optic pyrometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(2): 121~125
辛军, 冯其波, 林铁生. 高精度双波长非接触光纤高温计的波长最优设计[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(2): 121~125
- 12 N. J. McCormick. Inverse radiative transfer problems: a review[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1992, (112): 185~198