

文章编号:1674-2869(2008)03-0118-04

应用 CCD 测量火焰温度精度问题的研究

夏守之, 郭 焱

(武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:应用彩色 CCD(电荷耦合元件)测量火焰温度场是一种实时动态测温的好方法,通过分析影响测量结果准确性的主要因素,对它们可产生的测量相对误差进行了计算,结果表明这些因素的影响不可小视,误差的修正有助于提高测量精度,这种方法有助于火焰研究和实际生产中应用。

关键词:CCD 摄像机;温度场测量;辐射;精度

中图分类号:TN 911.73

文献标识码:A

0 引 言

燃料燃烧作为工业生产中直接能源广泛使用,为监控其燃烧状况、控制燃烧产物的种类及其浓度、提高燃料的燃烧有效利用率,一般需要对其火焰的温度进行测量。特别是近年来,由于节能环保的要求提升,大量新型燃料燃烧技术被采用,污染气体的产生需控制,人们对火焰的温度场测量有了更高精度要求。由于燃烧物温度的高速起伏变化的特性和被测对象光热性质的复杂性,燃烧场的温度实时准确测量成了燃烧工作研究的有效手段,不少科研工作者致力这个问题的解决^[1~5]。早期的研究者主要用热电偶、光学高温计、红外测温仪测温^[1],它们被用于研究准静态或稳态气体燃料燃烧过程,这些方法在对空间或时间上的温度平均值取得了相当大的成功,随着问题研究的深入,人们希望得到动态实时燃烧场准确无损测量,寻求能避免高温环境的影响和其它测量误差因素的干扰的良好测量方法,以求获得实时高精度的场分布测量替代传统的点测量方法。这类问题深入研究非常有价值,精确测量能提高燃料的燃烧效率、监控燃烧过程、提高生产质量、保护生态环境、实现安全生产。

由于 CCD 器件性能的不断提高,人们借助性能良好的高速彩色 CCD 摄像机通过摄取燃烧火焰光电图像来分析其燃烧的状况^[2~4],通过对获取的火焰图像进一步处理得到燃烧温度场分布状况^[5~8],进而研究高燃烧效率的燃烧条件,监控燃烧过程,测量燃烧排放物(SO₂、CO₂、CO)的浓度,研究减少污染气体产生的条件。

由于燃烧条件的轻微变化会使燃烧物的种类和浓度发生较大的变化,常规的测量方法很难获得高温动态变化场分布,笔者通过使用 CCD 获取光电图像可有效解决这些方面的问题。为获得高质量的光电图像,本文分析影响成像质量的几种因素,考虑火焰产物的发射系数随波长变化而变化的特性,建立线性变化的数学模型,同时细分 CCD 器件对不同光波的光谱响应变化特性,考虑光电器件有暗电流的特征,注意 CCD 器件对高温测量需进行 γ 校正的特性,逐个分析它们影响测量精度的程度,以便改善火焰温度场的测量精度。

1 火焰 CCD 图象的成像机理

在测量火焰温度场时,利用彩色 CCD 摄像机记录测试的光学信息,通过条纹滤波器将这些信息分解成红(R)、绿(G)和蓝(B)三色信号,根据国际通用标准(CIE1931),R, G, B 三色光的标准波长分别为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm,将彩色 CCD 器件获取三色视频信号转化成三色亮度相关数字信号,经过图像卡量化处理后送入计算机保存,再由计算机进行相应的处理,最后获得温度分布的相关信息。

CCD 的测量的是二值化电压 $V_l(x, y)$, 根据辐射理论和 CCD 工作原理,其大小与测试点对应的光照度 $L_l(x, y)$ 、辐射亮度 $B_l(x, y)$ 和火焰单色辐射度 $M_\lambda(T)$ 有关。

$$L_l(x, y) = \tau_l \pi B_l(x, y) (D/2f)^2 \quad l = 1, 2, 3$$

$$B_l(x, y) = K_{l2} \int_{\lambda_{l1}}^{\lambda_{l2}} f_l(\lambda) M_\lambda(T) d\lambda$$

收稿日期:2007-11-12

基金项目:本项目获得国家自然科学基金项目(50636010)和湖北教育厅科研项目(D200615003)资助

作者简介:夏守之(1965-),湖北石首人,博士,副教授,研究方向:光学测量和光学图像处理。

$$V_l(x, y) = K_{ll} L_l(x, y) t = K_{ll} Q_l(x, y) \quad (1)$$

(1)式中 $l=1, 2, 3$ 分别代表蓝绿红3种颜色, K_{ll} 、 K_{l2} 为仪器相关参数, $Q(x, y)$ 为采样间隔时间 t 内摄像机接收到的辐射曝光量, τ_l 为光学系统的透过率, D 为镜头光圈有关的出瞳直径, λ_{li} 和 λ_{hi} 为摄像机最短和最长响应波长, $f_l(\lambda)$ 为 CCD 的三色光谱响应函数。

在测量过程中,摄像机至燃烧火焰距离远大于镜头焦距,CCD 摄像机通过时序电路将 CCD 输出电流顺序放大,由于火焰高温环境易达饱和还需进行了 γ 校正,图像传输时对图像信号进行编码并以形成标准制式视频信号(PAL 制)。本文不考虑图像视频编码的影响,CCD 摄像机对应 (x, y) 处的输出电压 $V_l(x, y)$ 与该点的曝光量关系可写为:

$$V_l(x, y) = K_3 (Q_l(x, y))^{\gamma} + V_0 = K_4 \left(\int_{\lambda_{li}}^{\lambda_{hi}} f_l(\lambda) M_{\lambda}(T) d\lambda \right)^{\gamma} + V_0; \quad Q(x, y) < Q_{max} \quad (2)$$

(2)式中 K_3 、 K_4 为系统相关系数, Q_{max} 为最大曝光量, V_0 为暗电压,并有下面关系式 $K_4 = K_3 (K_{l2} \tau_l \pi B_l(x, y) (D/2f)^2)^{\gamma}$ 。可以看出能影响摄像机电压输出的主要因素有:火焰辐射亮度、镜头光圈和电子快门时间,而且输出电压与曝光量是非线性关系。早期的线性处理是造成以往测温结果偏差较大的原因之一。

如果彩色 CCD 摄像机有 3 个颜色是独立窄带滤波片,则辐射亮度 $B_l(x, y)$ 可表示为:

$$B_l(x, y) = K_{l2} \tau_l \pi f_l(\lambda) M_{\lambda}(T) \Delta\lambda_l \quad (3)$$

(3)式中 λ 、 $\Delta\lambda$ 和 τ 分别为各滤波片的等效中心波长、带宽和通过率; $B(x, y)$ 为波长 λ 对应的火焰辐射强度。在实验中,通过控制快门或光圈使得曝光量小于最大曝光量,即正常曝光条件下,若不考虑 γ 校正和暗电流的影响,可得图像在 (x, y) 处的三色电压值与火焰辐射度关系表示为:

$$M_{\lambda}(T) = K_l V_l(x, y), l=1, 2, 3 \quad (4)$$

考虑 γ 校正和暗电流影响,图像在 (x, y) 处测量的电压值与火焰辐射度关系可表示为:

$$M_{\lambda}(T) = K_l (V_l(x, y) - V_{l0})^{1/\gamma}, k=1, 2, 3 \quad (5)$$

2 光辐射测温理论

应用辐射法测量火焰温度的基础理论为普朗克定律、维恩定律和斯忒藩玻耳兹曼定律。根据热辐射理论,灰体的单色辐射度 $M_{\lambda}(T)$ 遵从普朗克的辐射定理。考虑到 CCD 采集的信号只能在可见光波段,单色辐射度与温度的关系可写

为:

$$M_{\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda}(T) C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (6)$$

(6)式中 C_1 和 C_2 分别为第一辐射常数和第二辐射常数, T 为辐射物体的温度, $\epsilon_{\lambda}(T)$ 为燃料的辐射波长为 λ 温度为对应的辐射系数。

若采用 3 个波长 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 同时测量同一点温度,则根据(6)式可得该点的比色温度:

$$T = \frac{C_2 (2/\lambda_2 - 1/\lambda_1 - 1/\lambda_3)}{\ln \frac{M_{\lambda_1}(T) M_{\lambda_3}(T)}{M_{\lambda_2}^2(T)} + \ln \frac{\epsilon_{\lambda_2}^2(T)}{\epsilon_{\lambda_1}(T) \epsilon_{\lambda_3}(T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1 \lambda_3}} \quad (7)$$

从(7)式可看出,当 CCD 器件的工作时,其系统诸多特性对测试结果的影响,如光谱响应特性、暗电流、噪声和饱和电流等。

3 影响温度测量精度的因素

3.1 燃烧产物热辐射系数的影响

热辐射理论表明,单色辐射系数不仅与燃烧场的温度和辐射波长有关,而且辐射方位角、燃烧物质种类、燃烧器具形状及表面状况都影响单色辐射系数值。实际火焰在整个波段的辐射系数变化非常大,即不同波长不同温度条件下对应不同的单色辐射率,因此考虑光谱发射率的影响,测量温度示值并不是物体的真温,得到的只是亮度温度,因此精确测量就需对上述温度进行修正。考虑工况条件、燃烧反应程度、火焰构成成分、燃料空气成分比等因素对测量结果的影响,实验中选择火焰热辐射的发射物质尽可能少的光谱区间为测量波长带,并有效地避开气态组分的带状光谱的影响,但实际火焰非常复杂,CCD 器件性能无法达到理想条件,较难消除单色辐射系数变化对测量结果的影响。

对于具有连续辐射的物体,单色辐射系数函数关系可表示为^[9,10]:

$$\epsilon(\lambda, T) = \sum_{i=0}^n a_i \times \lambda_i \quad (8)$$

在较大测量波段,有限项多项式可逼近真实的单色辐射系数,但过多的项会带来复杂的计算过程,而简单的函数关系能够较易反演温度。如果测量波段选择在可见光区域,(8)式可简化^[9,10]:

$$\epsilon(\lambda, T) = a_0(T) + a_1(T) \lambda \quad (9)$$

(9)式中 a_0 和 a_1 为与温度有关的参数,如果 $a_1(T) = 0$ 表明该火焰为标准灰体,一般火焰对应的 $a_0(T) \neq 0$ 。

3.2 CCD 器件系统缺陷的影响

CCD 器件的工作时,其器件光谱响应特性影

响单色辐射度的测量,噪声值和暗电流大小影响电压输出产生失真,另外当温度过高会产生输出电压饱和,实验现象表明,当温度大于1380 K时,红光处呈现二值化电压达到极值255,当温度大于1430 K时,蓝色波长接收的光形成的电压也达到饱和,因此进行光强(校正非常必要.若仅考虑CCD摄像机光谱响应特性和噪声对图像的的影响,根据(4)~(7)式可得待测点的比色温度:

$$T = \frac{-875.76}{\ln \frac{V_1 V_3}{V_2^2} - \ln \frac{K_1 K_3}{K_2^2} + \ln \frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1 \epsilon_3} + 0.1133} \quad (10)$$

若考虑对饱和和电流的(校正和暗电流的影响,火焰温度可表示为:

$$T = \frac{-875.76}{\frac{1}{\gamma} \left[\ln \frac{(V_1 - V_0)(V_3 - V_0)}{(V_2 - V_0)^2} - \ln \frac{K_1 K_3}{K_2^2} \right] + \ln \frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1 \epsilon_3} + 0.1133} \quad (11)$$

4 结果与讨论

采用辐射法测量甲烷气体火焰,其热辐射光的波长集中在可见光和红外波段,火焰温度一般在1000~2000 K之间.通过对多个温度点进行CCD摄影机数据采集,然后进行数据处理,分析它们对测量精度的影响程度.

图1表示辐射率变化对温度精度的影响.本文认为辐射率单调增加,取初值 $a_0 = 0.6$,得到3个可连续变化单色辐射率,根据(10)式则可得3个单色辐射率比值量 x 的取值范围为1.0000~1.0202.图1中选取 $V_0 = 0, \gamma = 1.0, x = \frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1 \epsilon_3}$,图中横轴选 x ,纵轴为 $\Delta E = 100\% \times \frac{T - T_A}{T_A}$, T_A 为标准温度,根据(10)式可绘图1,数据线1~6依次1000+100*i*, $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$.

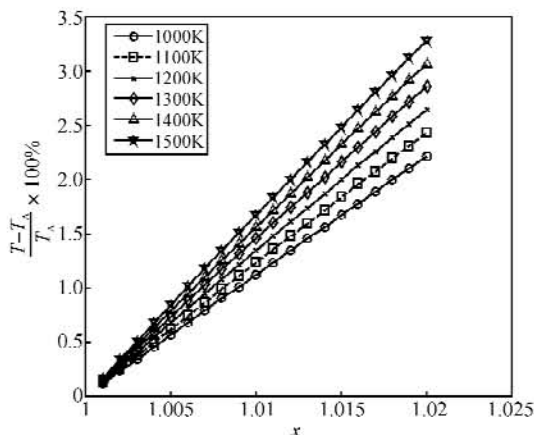


图1 辐射率对温度精度的影响

Fig. 1 The influence of emissivity to temperature precision

图2为器件谱响应特性对温度精度的影响,考虑器件谱响应系数 K 在不同波长的差异性,可得三个波长对应器件谱响应系数比值量 y 的取值范围为1.10~1.48,选 $V_0 = 0, \gamma = 1.0, x = 1.0$, $y = \frac{K_2^2}{K_1 K_3}$,根据(10)式绘制出图2,数据线1~6依次对应标温为1000+100*i*, $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$.

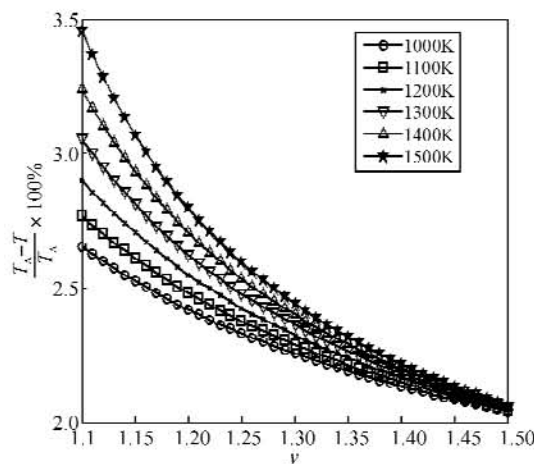


图2 器件谱响应特性对温度精度的影响

Fig. 2 The influence of characteristic of spectrum response to temperature precision

图3表示 γ 校正对温度精度的影响,图中选标准温度 T_A 取值1000~1500 K、步长100,根据(11)式绘制出不同 γ 校正参量对应温度测量误差.

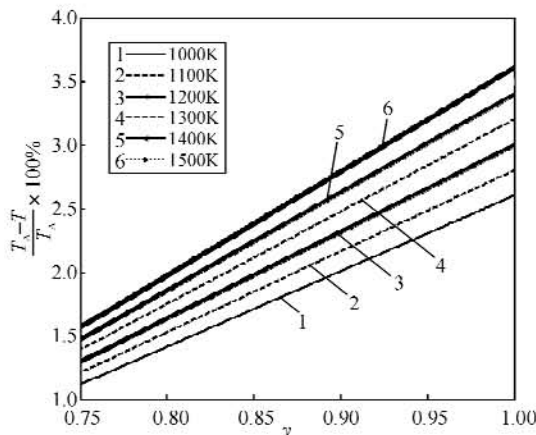


图3 γ 校正对温度精度的影响

Fig. 3 The influence of γ -correction to temperature precision

图4为器件的暗电压对温度精度的影响,图中选取测量条件是标准温度 $T_A = 1200$ K, $\gamma = 1.0, x = 1.02, V_b = \frac{V_1 V_3}{V_2^2}$,图4中横轴 V_b 为三色条件下测量的电压比,纵轴为相对误差,根据(11)式绘制出6种暗电压值对应曲线,数据线1~6依次对应 $V_0 = 0.5(1 + i), i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$.

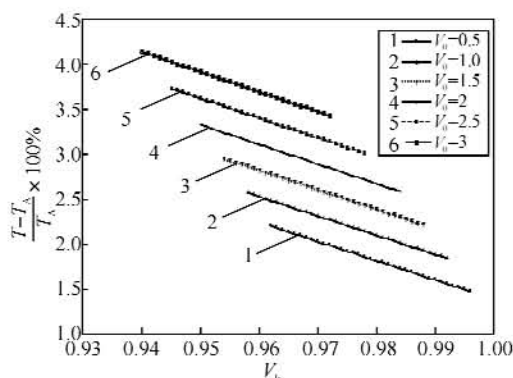


图4 暗电压对温度精度的影响

Fig. 4 The influence of dark voltage to temperature precision

5 结 语

本文考虑了对测量结果影响比较大的4种因素,它们分别是燃料燃烧时的单色辐射率特性、摄像机谱响应特性、电压饱和性和暗电压,通过相关的理论绘出了它们对温度值误差影响程度曲线。结果表明,实际火焰谱发射率与波长有关,很难满足三种波长的谱发射率相等的理想条件,若不考虑差异得到只是亮度温度,若想获得火焰的辐射准确温度,就需要对上述温度进行修正,单调增加的单色辐射系数的变化对温度相对误差的影响为0~3.5%。CCD器件在不同波长谱响应因子不同,若忽略它们的差异,会产生1.8%~3.3%的相对误差。CCD的饱和特性和暗电压值影响测量的输出电压值准确性,特别是对较高温测量 γ 校正非常有必要考虑,对较低温测量时暗电压的影响不可小视。在实际火焰温度场测量时,如果考虑这些

因素的影响,将极大改善测量精度,使CCD技术在火焰实时动态测温广泛使用成为现实。

致谢:本文工作得到华中科技大学周怀春教授的帮助和支持,特在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 朱德忠. 热物理激光测试技术[M]. 北京:科学出版社,1990.11-50.
- [2] 薛 飞. 基于面阵 CCD 的火焰温度场测量方法研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(1):39-41.
- [3] 蔡小舒,罗武德. 采用发射光谱法检测煤粉锅炉火焰的技术研究[J]. 动力工程,2000,20(6):955-959.
- [4] 卫成业,李晓东,马增益,等. 高温火焰图像处理比色测温法的数值方法研究[J]. 燃烧科学与技术,1998,4(3):307-311.
- [5] 王补宣. 图像处理技术用于发光火焰温度分布测量的研究[J]. 工程热物理学报,1989,10(4):446-448.
- [6] 周怀春. 炉膛火焰温度场图像处理试验研究[J]. 中国电机工程学报,1995,15(5):295-300.
- [7] 卫成业,王 飞,马增益,等. 运用彩色 CCD 测量温度场的校正算法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):70-73.
- [8] 宋文爱,李 磊,潘宏霞. CCD 数字图像处理炉膛火焰温度检测方法研究[J]. 华北工学院学报,2003,24(3):181-184.
- [9] 程晓舫,符泰然,王安全. 具有单调发射率表现的三波段温度测量方法[J]. 光谱学与光谱分析,2003,23(4):641-645.
- [10] 符泰然,程晓舫,陆少松. 三波长温度测量方法[J]. 计量学报,2004,25(2):123-126.

Research on the measuring precision of the flame temperature field using CCD

XIA Shou-Zhi, GUO Yan

(School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, we discussed a kind of method that the flame temperature field measurement method using colored CCD (charge couple device) camera. The main factor was analyzed which affect the measuring precision, and the relative error was calculated. The result indicates that is the factor can not be nelegeted, the error correction helps to imporove the measuring precision, which way has potential in industrial application.

Key words: CCD camera; temperature field measurement; radiation; precision

本文编辑:萧 宁