

·光电工程系统技术·

## 发射光谱层析重建温度场中的温度定标

张志敏, 常方飞, 张 辉

(南昌航空大学自动化学院, 无损检测重点实验室, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 基于黑体辐射理论, 重点对发射光谱层析(EST)重建温度场中的非接触式温度定标进行了研究. 实验结果表明, 非接触式温度定标方法(即黑体炉定标法), 能有效地避免由于接触式测温仪对原场的干扰所造成的误差, 也能有效地解决在发射光谱层析中高温区或超高温区的温度定标问题, 在接触式定标基础上提高了温度场重建精度、拓展了温度适用范围.

**关键词:** 发射光谱层析; 温度场; 黑体炉; 重建

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)01-0005-04

## Temperature Correction in the Temperature Field Reconstruction with Emission Spectrum Tomography

ZHANG Zhi-min, CHANG Fang-fei, ZHANG Hui

(Institute of Automation of Nanchang Hangkong University, Key Laboratory of Nondestructive Test Ministry of Education, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The non-contact temperature correction in the temperature field reconstruction with Emission Spectral Tomography (EST) is mainly studied based on the black-body radiation theory, the experimental result shows that the error caused by the interference of the contact thermodetector to the original field can be effectively avoided in the non-contact temperature correction (temperature correction with black-body furnace), the problem of the temperature correction in high-temperature area or super high-temperature area in the EST can also be solved, the accuracy of the temperature reconstruction can be improved on the basis of the contact correction, and the application scope of temperature can be extended.

**Key words:** emission spectral tomography; temperature field; blackbody furnace; reconstruction

发射光谱层析(emission spectral tomography, 简称 EST<sup>[1]</sup>)重建温度场的温度定标是 EST 系统最为关键的步骤之一, 有接触式和非接触式 2 种标定方法. 传统的标定方法即接触式温度定标法往往会在标定温度场的同时给流场引入新的元素而导致重建精度的下降. 接触式定标往往选用热电偶等接触式测量仪, 由于仪器本身温域的限制, 大大地限制了重建温度场的温区适用范围. 在黑体辐射理论的基础上, 利用黑体炉来标定重建后的温度场, 这是一种非接触式的标定方法, 可以减少由于引入热电偶等

接触式测温仪器而对原场分布的影响, 也可以解决重建高温或超高温场时, 接触式测量仪器所不能达到的定标问题.

### 1 发射光谱层析

以氧乙炔焰为研究对象, 氧乙炔等有机燃料的火焰场是一种弥散介质, 它在面阵 CCD 上成像过程如图 1 所示, 可以看作是离散化表示的火焰场各三维微元的辐射强度通过一定厚度的弥散介质并经过

收稿日期: 2008-12-15

基金项目: 航空科学基金(2006ZD56004); 国家自然科学基金(60577016)

作者简介: 张志敏(1982-), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要研究领域为发射光谱层析.

光学成像系统后的累积值.

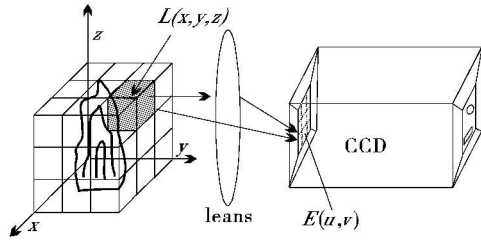


图 1 火焰微元经 CCD 成像示意图

火焰的微元通过光学镜头后在像面上产生的照度  $E(u, v)$  可由式(1)近似计算<sup>[2]</sup>

$$E = \frac{\pi}{4} nL \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{1}{(1-\beta)^2} \cos^4 \theta \quad (1)$$

其中,  $L$  为火焰场中某微元的辐亮度;  $D$  为入瞳直径;  $f'$  为焦距;  $\beta$  为光学系统的纵向放大率;  $n$  为光学系统的透射比;  $\theta$  为视场角.

由式(1)可知, 对于一定的光学系统在视场角较小(即 CCD 接收的像仅为部分与主光轴近似平行的光经光学器件成的像), 在忽略景深影响的条件下火焰微元在 CCD 靶面上的照度与微元亮度成比例, 所以 CCD 靶面上某一单位大小的照度可以看作对火焰辐亮度沿某条射线的积分, 如式(2)所示

$$E(u, v) = \int k_1 L(x, y, z) ds \quad (2)$$

式中,  $k_1$  为由光学系统所决定的比例系数.

照度  $E(u, v)$  经 CCD 光电转换和图像采集卡量化之后便得到图像灰度分布  $I(u, v)$ . 在 CCD 数字量化级别未达到饱和的条件下图像灰度与 CCD 靶面上的照度近似成比例. 即

$$I(u, v) = k_2 E(u, v) \quad (3)$$

其中,  $k_2$  为由光电转换和量化系统所决定的比例系数(与 CCD 本身性能相关, 不同的 CCD 此系数不同). 由式(2)、式(3)可得图像灰度和火焰辐亮度之间的关系如式(4)所示

$$I(u, v) = k_3 \int L(x, y, z) ds \quad (4)$$

其中, 系数  $k_3 = k_1 \times k_2$ . 系数  $k_3$  是由火焰采集系统决定的. 然后根据同时迭代重建算法(SIRT)<sup>[3]</sup>重建出用三维灰度场表示的火焰场三维形态, 最后可以由图像灰度结合温度定标系统反演得到火焰内部各点辐亮度分布, 结合式(8)或式(9)就可以计算火焰三维温度场的分布.

## 2 辐射测温原理及方法

普朗克根据热辐射量子统计理论导出了黑体的光谱辐出度与温度、波长的函数关系, 即普朗克定律

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

式中,  $V(\lambda, T)$  为黑体光谱辐出度, 其中  $\lambda$  为波长,  $T$  为热力学温度;  $C_1$  为第一辐射常数;  $C_2$  为第二辐射常数.

由发射率的定义及式(5)可得一般物体的辐亮度公式

$$L(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (6)$$

其中,  $\epsilon(\lambda, T)$  是物体的发射率. 黑体的发射率是 1, 灰体的发射率是 0~1 之间的一个常数. 在多波长辐射测温学领域被普遍认可的一种假设<sup>[4,5]</sup> 是认为光谱发射率随波长的变化而变化, 但是由于  $\epsilon(\lambda, T)$  的分布并没有固定的规律可寻, 目前在辐射测温领域都是对  $\epsilon(\lambda, T)$  以假设方程. 在温度变化不大时, 式(7)便是其中常用的假设方程之一.

$$\ln \epsilon(\lambda, T) = a + b\lambda, \quad (7)$$

式中,  $a, b$  是与  $\lambda, T$  无关的常数, 取决于发射材料以及传播环境. 选取一个波长  $\lambda^*$ , 由式(6)推导可得波长为  $\lambda^*$  时, 温度的计算公式

$$T =$$

$$\frac{C_2}{\lambda [\ln L(\lambda^*, T) + 5 \ln \lambda^* - \ln \epsilon(\lambda^*, T) - \ln C_1]} \quad (8)$$

选择 2 个不同的波长  $\lambda_1, \lambda_2$ , 由式(8)推导可得双波长温度计算公式

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (9)$$

对于灰体, 由式(9)可知, 如若选取的 2 个波长  $\lambda_1 \approx \lambda_2$ , 则  $\ln[\epsilon_1(\lambda_1, T)/\epsilon_2(\lambda_2, T)] \approx 0$ , 所以通过双波长公式(9)计算温度可以一定程度地减少发射率的不确定性对温度计算产生的影响, 故而只要测出或通过运算得出两波长下同一点的 2 个辐亮度就可以由式(9)求出此点温度.

对于 EST 系统必须进行标定. 由式(4)可知, 由火焰投影图像重建的强度值  $I$  与火焰辐亮度  $L$  之间有一个系数, 该系数是由重建系统确定的, 对于确定的重建系统, 设  $L = A \times I$ , 在一定温度范围内忽略温度对发射率的影响, 由式(8)可得

$$T = \frac{C_2}{\lambda [\ln(AI) + 5\ln\lambda - \ln\epsilon(\lambda) - \ln C_1]} = \frac{C_2}{\lambda [\ln I + 5\ln\lambda - \ln C_1 + (\ln A - \ln\epsilon(\lambda))]} = \frac{C_2}{\lambda [\ln I + 5\ln\lambda - \ln C_1 + \eta]} \quad (10)$$

其中,  $\eta = \ln A - \ln\epsilon(\lambda)$  为要标定的由系统确定的系数,对于三维温度场中的一点,温度  $T$  可由单点测温仪器测得,  $I$  为重建强度值,波长为已知值,其他为常数. 这样通过式(10)可以求得系数  $\eta$ . 系统标定后就可以将任意一点的重建强度值  $I$  代入式(10)计算该点的温度.

同理,对双波长测温系统由式(9)可得

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \frac{A_1 I_1}{A_2 I_2} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)} - 5\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \frac{I_1}{I_2} - 5\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + (\ln \frac{A_1}{A_2} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)})} = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln \frac{I_1}{I_2} - 5\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \zeta} \quad (11)$$

式中,  $A_1, A_2$  为重建系统确定的 2 个通道的系数;  $\zeta$  为要标定的由系统确定的系数. 对于三维温度场中的一点,温度  $T$  可由单点测温仪器测得,  $I_1, I_2$  为重建强度值,波长为已知值,其他为常数. 这样通过式(11)可以求得系数  $\zeta$ . 系统标定  $\zeta$  后就可以根据任意一点 2 个波长下的重建强度值  $I_1, I_2$  计算出该点的温度.

### 3 接触式温度定标

对于单波长重建,接触式温度定标即利用单点接触式测温仪测量火焰场中某一空间点位置的温度  $T(x, y, z)$ ,然后将  $T(x, y, z)$  和 CCD 前的窄带滤波片的中心波长  $\lambda_m$  以及通过计算机软件运算重建出的灰度值  $I$  代入式(10)中,可求得需标定的系数  $\eta$ .

对于双波长重建,接触式温度定标仍用单点接触式测温仪测量火焰场中某一空间位置的温度  $T(x, y, z)$ ,然后把  $T(x, y, z)$ 、2 个窄带滤波片的中心波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 、通过软件重建出的同一空间点的不同波长下的强度  $I_1$  和  $I_2$  代入式(11)可求得需标定的系数  $\zeta$ .

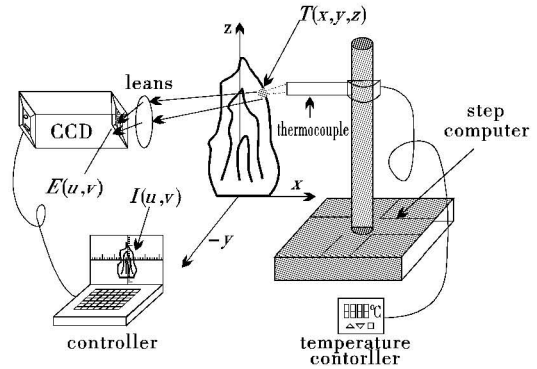


图 2 接触式温度定标示意图

如图 2 所示为热电偶单点测温以及计算机温度标定示意图,为精确控制热电偶在火焰温度场中的位置,采用 SC2 步进电机和 TSA 电控位移台固定和控制热电偶,位移台的分辨率为  $2.5 \mu\text{m}$ .

### 4 非接触式温度定标(黑体炉定标)

根据式(4)可知,  $L$  与  $I$  有定比例系数  $\alpha$  的关系,故而求得辐亮度分布的另一关键步骤就是需实验定标系数  $\alpha$ ,此处是用黑体炉来进行非接触式温度定标.

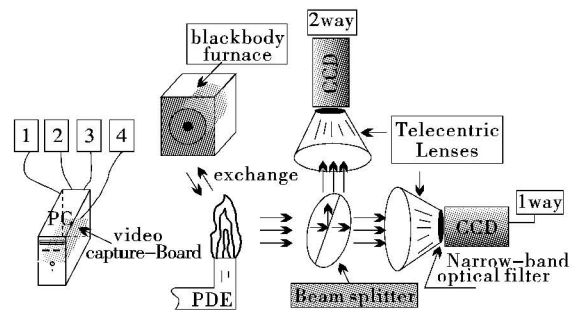


图 3 黑体炉定标示意图

如图 3 所示为黑体炉<sup>[6]</sup>标定示意图,首先根据预先设置好的温度让黑体炉达到稳定工作状态,然后将黑体炉出射孔放置在焰场中心位置,再由采集过火焰场的采集系统不做任何改动的正对着采集黑体炉出射孔的辐出度. 然后由式(12)可得出灰度转辐亮度系数

$$\alpha = V/I \quad (12)$$

式中,  $V$  为黑体炉稳定工作时对应的某温度波长下的黑体辐亮度,可以由式(5)算出;  $I$  为采集系统对

准黑体炉出射孔采集的有效数据的均值。

由式(8)可知,要求得单波长重建的温度场的温度分布除已知辐亮度  $L$ ,还需要知道  $\epsilon(\lambda, T)$ ,而不同的燃烧介质将会对应不同的  $\epsilon(\lambda, T)$ ,故而非接触式温度定标不适用于单波长重建火焰场燃烧介质发射率未知的情况。双波长或多波长温度场重建时由于选取的波长相近,故而发射率差值较小,由式(9)可知,在波长较为接近的情况下,非接触式温度定标即黑体炉温度定标是可以较准确地标定出温度场系数  $\zeta$ 。

## 5 重建温度场非接触式温度定标实验

接触式温度定标他人<sup>[7]</sup>已有较多的研究,这里便不再赘述,重点就非接触式温度定标做实验研究。

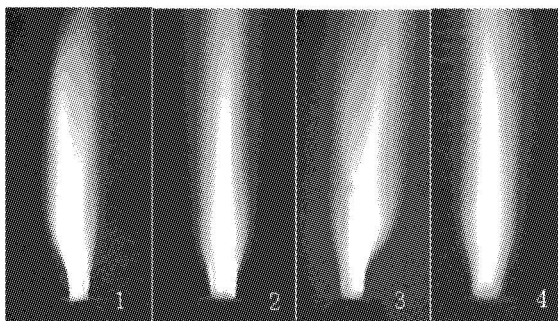


图 4 四路 CCD 某一时刻氧乙炔焰灰度图

图 4 所示为某一时刻 CCD 采集的四路氧乙炔焰灰度图,其中 1、3 号 CCD 前的滤波片中心波长为 515 nm,2、4 号 CCD 前的滤波片中心波长为 546 nm。经软件重建的灰度比值三维切片图为图 5 所示,图 6 为经黑体炉温度定标后的温度场三维切片图。由于氧乙炔焰的最高温度大于 3 000 °C,超出了常规接触式测温仪器的上限,故而接触式温度定标

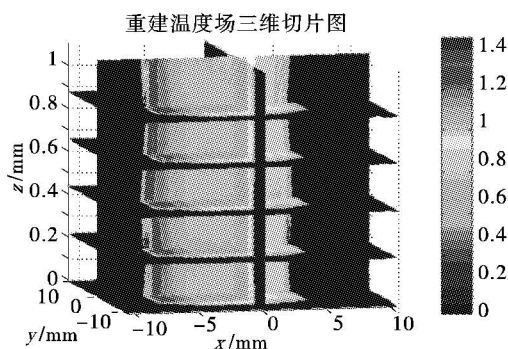


图 5 双波长重建灰度比值图

不适用于此火焰场的温度定标,通过对图 6 所示火焰场温度分布进行分析研究,其基本上真实地反应了氧乙炔焰内部温度分布,达到了温度定标的目的。

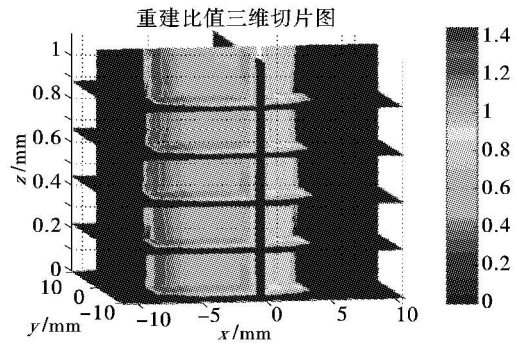


图 6 黑体炉定标后的温度场切片图

## 6 结 论

进行了大量的实验,结果表明,提出的非接触式温度定标 EST 系统的方法,有效地解决了在发射光谱层析中高温或超高温流场的温度定标问题,扩展了 EST 技术的适用温度范围,与接触式温度定标相比有不干扰原场分布即时重建即时定标的优点,解决了由于温度定标时对原场的干扰而引入重建误差的问题。

### 参考文献

- [1] X Wan, S Yu, Y Gao, et al. Self-adaptive reconstruction algorithm for emission spectral volume tomography[J]. Opt. Eng., 2004, 43(5): 1244 - 1250.
- [2] Hui Li, Xiong Wan, Taoli Liu, et al. A computed tomography reconstruction algorithm based on multipurpose optimal criterion and simulated annealing theory[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(6): 340 - 343.
- [3] 万雄. 发射光谱层析算法研究及其三维流场重建应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2005.
- [4] 李奇楠, 徐晓轩, 武中臣, 等. 多光谱辐射测温的正交多项式回归方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(12): 2173 - 2176.
- [5] 孙晓刚, 戴景民, 丛大成, 等. 多光谱辐射测温的理论研究—发射率模型的自动判别[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(3): 221 - 225.
- [6] 周玮, 高魁明. 中高温黑体炉的研制及精度评价[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1997, 18(3): 307 - 311.
- [7] 李辉. 发射光谱层析火焰温度场三维重建研究[D]. 南昌:南昌航空大学硕士学位论文, 2007.