

文章编号:1004-4213(2010)06-1010-4

# 差分吸收光谱 CT 诊断技术\*

李春芳

(中南民族大学 电子与信息工程学院,武汉 430074)

**摘要:**提出了浓度场测量的差分吸收光谱层析技术,设计出一种由光源及控制系统、光学扫描测量系统和数据采集及处理系统三部分组成的典型差分吸收光谱层析诊断系统.采用改进的联合代数重建算法进行层析图像重建,数值模拟结果表明:在  $0^\circ \sim 180^\circ$  视场范围内,在 4 个不同的投影方向获取投影数据的条件下,能有效地重建出待测场分布,其最大误差不大于 5%,平均误差不大于 1%.

**关键词:**差分吸收;图像重建;CT 技术;数值模拟

**中图分类号:**TH773

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103906.1010

## 0 引言

燃烧气体是一种化学反应流体,内含多种化学成分,其组份和浓度场都随时间不断发生变化.燃烧气体的组份和浓度场是燃烧状态分析和燃烧技术发展的基础,它们的测量对于燃烧研究、燃烧诊断、改进燃烧设计、燃烧系统的经济运行以及环境保护都有着十分重要的意义.在浓度场测量中,为消除背景噪声的影响,应采用差分吸收光谱技术<sup>[1-2]</sup>.本课题组在前期研究层析(Computerized Tomography, CT)技术的基础上<sup>[3-4]</sup>,提出了浓度场测量的差分吸收光谱 CT 技术,即让激光器输出两个波长的激光,其中一个波长与被测分子的一条特征谱线重叠产生共振吸收,另一个波长则刚好移出被测分子的特征谱线而不产生共振吸收,两波长相差甚微,只要测量这二个波长的吸收光谱强度就可以得到该分子的积分浓度,同时进行多方位差分吸收光谱测量,并运用 CT 技术就可得到该分子的浓度场分布.

## 1 差分吸收光谱 CT 诊断系统设计

燃烧气体中的主要成份有 NO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CH、OH 等,这些分子在近紫外和可见光波段有特征谱线<sup>[5]</sup>.为了探测其浓度场,构建的差分吸收光谱 CT 诊断系统如图 1,它主要由光源及控制系统、光学扫描测量系统和数据采集及处理系统三部分组成.

### 1.1 光源及控制系统

双波长双脉冲调 Q 的 Cr:LiSAF 激光器在波长

范围、脉冲的时间间距、谱线宽度等方面均可满足差分吸收光谱 CT 测量的要求,并已在“激光雷达监测大气污染”这一项目中得到了很好的应用<sup>[6]</sup>.本测量系统中也选用该激光器作为光源,应用吸收光谱法,利用倍频等非线性手段产生的倍频光,可以探测燃烧气体中的所有成份并重建出浓度场分布.

本系统采用的双波长双脉冲调 Q 的 Cr:LiSAF 激光器有两个调谐装置,能输出相差甚微的两个波长的激光.通过计算机控制高速旋转的两块平镜,三个锆钛酸铅传感器及点火闪光灯实现二个波长的快速切换,切换时间小于 3 ms.为了保证激光器输出的一个波长  $\lambda_{on}$  与被测分子特征谱线重叠,而另一个波长  $\lambda_{off}$  则刚好移出吸收峰,采用反馈方法由计算机控制步进电机从而控制调谐装置,以便激光器输出正确的波长.当激光器输出一个波长  $\lambda_{on}$  时,同时在 4 个方位采集光谱图像,接着进行波长切换,当激光器再次输出另一个波长  $\lambda_{off}$  时,又同时采集 4 个方位的光谱图像,利用两次在同一方位采集的光谱信息(强度)就可获得该分子的积分浓度<sup>[7]</sup>.

### 1.2 光学扫描测量系统

图 1 中的光学扫描测量系统主要由反射镜、分束镜、扩束镜、以及大口径透镜组成(图 1 为示意图,略去了投影测量时的准直和扩束).由少数投影图像重建的结果可知,一般取 4 个投影方向数即可较好地重建出原始图像,因此,在设计光学系统时也考虑将激光器发出的光分为 4 束,分别扩束后从不同的方位角透过待测浓度场,然后在浓度场的另一端用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)摄像机测量透后的光强,并将测得的数据经采集卡输入计算机进行处理.

\* 国家自然科学基金(69878007)资助项目

Tel:027-67842854

Email:licf@scuec.edu.cn

收稿日期:2008-11-04

修回日期:2010-02-03

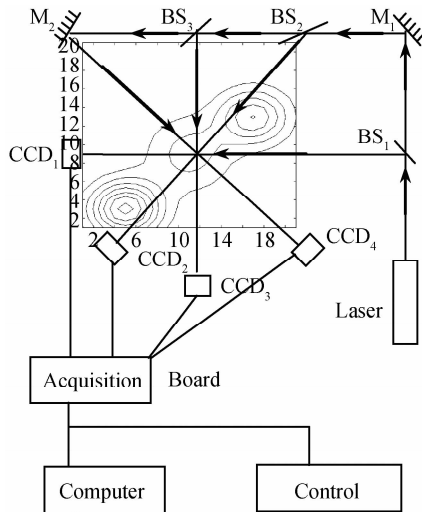


图1 差分吸收光谱 CT 测量系统

Fig. 1 Sketch of CT measure system based on differential optical absorption spectroscopy

为了计算机处理的方便,可将激光束分为光强相等的 4 束,这时分束镜  $BS_1$ 、 $BS_2$ 、 $BS_3$  的反射透射比分别为 1:3、1:2、1:1,并使任意相邻两光束的角度差相等,均为  $45^\circ$ ,这样在进行图像重建时可以得到较好的重建结果。

### 1.3 数据采集及处理系统

数据采集系统由 CCD 摄像机、高速数据采集卡组成。由于激光双波长的切换时间小于 3 ms,采集卡必须在 3 ms 内同时采集 4 幅图像,并同时输入计算机进行处理,然后重建出浓度场的分布,再进行可视化处理后送入监视器进行直观显示。如要进行实时测量,就需要周期性地数据进行采集、数据处理并重建图像。周期越短,对数据处理及图像重建的速度要求就越高,在本测量系统中一般取测量周期约为 1 s。本文采用存储器直接存储方式和图像压缩技术能在 3 ms 内将同时采集的第一波长的 4 幅光谱图像数据高速存储到存储器,这使得第二波长的 4 幅光谱图像数据的快速采集成为可能。

相关软件控制部分主要完成对采集卡的控制,从采集卡存储器内读取数据并存储到计算机内存,对采集的数据进行处理和分析并重建浓度场的分布,以及对被测浓度场进行可视化处理。

## 2 重建算法

代数重建法适用于少数投影“非完全数据”的图像重建,其中的联合代数重建法(Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique, SART)是最常用的重建算法。它的重建公式是

$$f_j^{(k+1)}(x, y) = f_j^{(k)}(x, y) + \frac{\sum_{i=1}^I r_{ij} \epsilon_i}{\sum_{i=1}^I r_{ij}} \quad (1)$$

然而,当投影方向数减少时,SART 存在明显的边缘效应,不能精确地重建出原物理量场。分析 SART 的迭代过程可以看出,投影数据的贡献项均来自于  $r$  和  $f$  的乘积,误差源于投影数据与重建数据中  $f$  的不一致,也就是说  $f$  才是误差产生的决定因素, $r$  只对误差起放大作用,因此以  $r$  作为误差分配的唯一准则显然是不合理的,这也是 SART 产生边缘效应的主要原因。基于此原因,对 SART 公式(1)做出改进

$$f_j^{(k+1)}(x, y) = f_j^{(k)}(x, y) + \frac{\sum_{i=1}^I r_{ij} f_j^{(k)}(x, y) \epsilon_i}{\sum_{i=1}^I r_{ij}} \quad (2)$$

由于分母中含有  $f_j(x, y)$ ,显然初值不能设为零,研究表明:只要初始值选为非零的相等值,收敛速度和重建精度都是相同的<sup>[8]</sup>。

改进的联合代数重建法(Modified SART, MSART)修正项分子乘积中含有  $f_j^{(k)}(x, y)$ ,这就意味着在数值修正的过程中,一旦某个像素的灰度值调至零,则大小将不再改变。那些灰度值接近于零的像素,在数值调节中很有可能被“囚于”零处,必然造成误差、影响精度。为此设计的信息处理方法是:在编程时给所有像素值加上一个常数  $c$ ,重建结果再减去  $c$  即可得原始数值。从理论上讲,只要  $c$  为正值即可,但考虑到精度要求, $c$  的取值应小于函数最大值的 1%。显然,重建区域的值是大于零的(一般定义的物场或图像均大于零),且物场相邻区域是平滑的,故选用带通滤波函数检测锐点,再进行平滑。

## 3 数值模拟

选择单高斯函数和三高斯函数作为实验函数进行数值模拟。单高斯函数的具体形式为

$$f_1(x, y) = 10 \times \exp \{ -30 \times [(x-0.5)^2 + (y-0.5)^2] \} \quad (3)$$

三高斯函数具体形式为

$$f_2(x, y) = 15 \times \exp [ -40 \times (x-0.2)^2 - 50 \times (y-0.1)^2 ] + 10 \times \exp [ -40 \times (x-0.8)^2 - 50 \times (y-0.6)^2 ] + 5 \times \exp [ -25 \times (x-0.5)^2 - 50 \times (y-0.4)^2 ] \quad (4)$$

定义误差:  $\text{err}_j = \frac{|f - f^*|}{|f_{\max}|}$ ,  $e_{\text{ave}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \text{err}_j$ ,

$e_{\max} = \max(\text{err}_j)$ 。其中,  $\text{err}_j$  为基于最大值的误差,  $e_{\text{ave}}$  为平均误差,  $e_{\max}$  为最大误差,  $f^*$  表示像素的重建值。设原始图像定义在  $0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1$  的正方形区域内,将此区域划分为  $20 \times 20$  个网格,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内取 4 个投影方向角 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ),

采样间隔为 0.025, 利用改进的联合代数重建法对

两函数进行重建, 重建结果见图 2 和表 1.

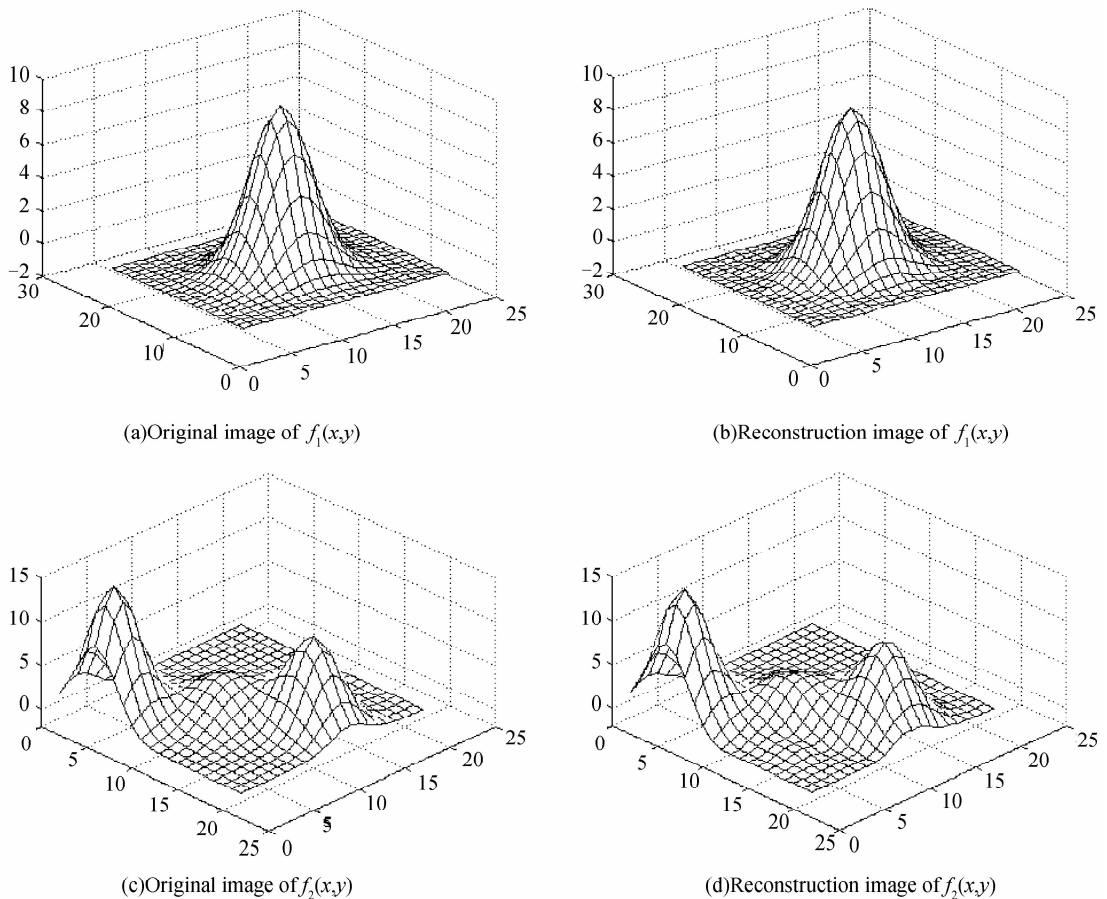


图 2 单高斯函数和三高斯函数的原始图及重建图

Fig. 2 The original images and reconstruction images of  $f_1(x,y)$  and  $f_2(x,y)$

表 1 单高斯函数和三高斯函数的重建误差

Table 1 The errors of  $f_1(x,y)$  and  $f_2(x,y)$

Model function	$e_{ave}/(\%)$	$e_{max}/(\%)$	Iteration number	Projection number
$f_1(x,y)$	0.33	2.33	20	160
$f_2(x,y)$	0.99	4.98	20	160

注:  $45^\circ$  和  $135^\circ$  两方向的投影数据均为 60, 而  $0^\circ$  和  $90^\circ$  两个方向的实际投影数据各为 20.

## 4 结论

本文设计出一种典型的差分吸收光谱 CT 诊断系统, 主要由光源及控制系统、光学扫描测量系统和数据采集及处理系统三部分组成. 采用改进的联合代数重建算法进行 CT 图像重建, 数值模拟结果表明: 在  $0^\circ \sim 180^\circ$  视场范围内, 在 4 不同的投影方向获取投影数据的条件下, 能有效地重建出待测场分布, 其最大误差不大于 5%, 平均误差不大于 1%, 为光学层析技术的实用化发展奠定了基础.

## 参考文献

[1] AVINO P, MANIGRASSO M. Ten-year measurements of gaseous pollutants in urban air by an open-path analyzer[J].

*Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4138-4148.

[2] KOKHANOVSKY A A, ROZANOV V V. The uncertainties of satellite DOAS total ozone retrieval for a cloudy sky[J]. *Atmospheric Research*, 2008, **87**(1): 27-36.

[3] LI Chun-fang. Optimization design of view directions in dynamic measurement of CT[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2006, **25**(2): 44-46.

李春芳. CT 动态测量中投影方向优化设计[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2006, **25**(2): 44-46.

[4] LI Chun-fang, SHI Du-fang, HE Yu-long. Modified simultaneous algebraic reconstruction technique and its information processing[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2004, **32**(10): 10-12.

李春芳, 是度芳, 贺渝龙. 联合迭代重建的算法改进及其信息处理设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, **32**(10): 10-12.

[5] ZHU Yan-wu, XIE Pin-hua, LIU Wen-qing, et al. Long path differential optical absorption spectroscopy based on CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2257-2262.

朱燕舞, 谢品华, 刘文清, 等. 以 CCD 为探测器的长程差分吸收光谱系统[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2257-2262.

[6] LIU Hui-ping, SHI Du-fang, HE Yu-long, et al. Dual-end differential absorption laser system and its measurement for the atmospheric pollution[J]. *Journal of Optoelectronics · laser*, 2001, **12**(1): 65-66.

刘会平, 是度芳, 贺渝龙, 等. 双端差分吸收激光雷达及其大气

- 污染测试[J]. 光电子·激光,2001,12(1):65-66.
- [7] MA Jin-ji,LI Su-wen. Retrieving method of differential optical absorption spectroscopy based on M-estimator robust regression[J]. *Acta Photonica Sinica*,2009,38(8):2035-2039. 麻金继,李素文. 基于稳健回归 M 估计的差分吸收光谱反演方法[J]. 光子学报,2009,38(8):2035-2039.
- [8] LI Chun-fang. Modified simultaneous algebraic reconstruction technique and its application to image reconstruction [C]. *SPIE*,2007,6279:627932-1-627932-7.

## Computerized Tomography Technique Based on Differential Optical Absorption Spectroscopy

LI Chun-fang

*College of Electronics and Information Engineering, South Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China*

**Abstract:** A new computerized tomography (CT) technique based on differential optical absorption spectroscopy for the measurement of concentration field is proposed. A typical CT diagnoses system is designed, which consists of three parts: the lamp-house and its control system, the optical scanning measurement system and the data collecting and processing system, and numerical simulations are made. The results show that the projection data are obtained at only four viewing directions from range  $0^\circ$  to  $180^\circ$ , the maximum error of reconstruction image is less than 5%, and the average error is less than 1%.

**Key words:** Differential absorption; Image reconstruction; Computerized Tomography (CT); Numerical simulation



**LI Chun-fang** was born in 1965, and received the Ph. D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2003. Now he is an associate professor, and his research interests include optical CT, photoelectronic detecting and imaging.