

# 调焦辐射层析成像法重建三维发光体辐射场\*

陆永刚 王式民 朱 震 陆 勇 徐益谦  
(东南大学热能工程研究所, 南京 210096)

**摘 要** 提出了用一个摄像机重建三维发光体辐射场分布的方法。连续的三维发光体可以看成若干个互相平行的二维发光断层的组合。对发光体某断层进行聚焦摄像, 得到的图像是该断层的高斯像和其他断层的离焦像的叠加像。对不同断层分别聚焦摄像, 可得到一组辐射图像, 再用图像反演算法, 即可重建各断层的辐射场。实验模拟了具有多断层的三维发光体, 获得了初步结果。  
**关键词** 三维发光体, 辐射场, 图像重建。

三维发光体(如火焰、等离子体)辐射场分布的测量对研究三维发光体的特性有重要意义。高温辐射计只能测量对象的总体辐射, 实际上只是一种点测量方法。热辐射成像方法可以测量对象的辐射分布, 但只是二维分布, 是一种面测量方法<sup>[1]</sup>。计算机层析法的出现虽提供了三维体成像的概念和方法, 且使基于此项技术的多种方法得到了应用<sup>[2]</sup>, 如激光全息干涉层析法、激光荧光层析法等, 但这些方法都是利用外光源测量对象的折射率或吸收率场, 光路比较复杂。辐射计算机层析法直接利用对象的辐射特性, 测量对象的辐射场<sup>[3]</sup>, 然而计算机层析法由于其旋转扫描接收投影特性, 设备还是显得复杂。本文提出的调焦辐射层析成像法, 直接利用发光体本身的辐射信息, 只用一个摄像机就可测量对象的三维辐射场。

## 1 原 理

建立坐标系, 取主光轴为  $z$  轴(如图 1)。透镜置于  $z = 0$  处,  $z > 0$  为发光体物空间,

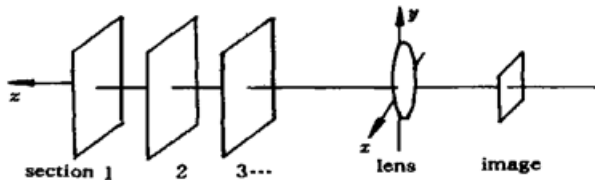


Fig. 1 The diagram of optical system

$z < 0$  为发光体像空间。将三维发光体分解成  $n$  层二维发光断层, 不同断层的位置为  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , 辐射出射度为  $f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_n(x, y)$ 。依次对不同断层聚焦摄像得到一组叠加像, 其辐照度分别为  $i_i(x, y) (i = 1, 2, \dots, n)$ , 得到的辐射图像  $i_i(x, y)$  是该断层图像的高斯像和其他断层图像的

离焦像的叠加像, 其辐照度是不同断层辐射出射度和点扩散函数  $h_{ij}(x, y)$  (聚焦顺序  $j = 1, 2, \dots, n$ ) 的卷积和。假设各断层之间辐射不互相吸收, 辐射光是单色非相干光, 且满足线性

\* 国家自然科学基金资助项目(5980076009)。

空不变条件，则

$$i_1(x, y) = f_1(x, y) \otimes h_{11}(x, y) + f_2(x, y) \otimes h_{12}(x, y) + \dots + f_n(x, y) \otimes h_{1n}(x, y)$$

$$i_2(x, y) = f_1(x, y) \otimes h_{21}(x, y) + f_2(x, y) \otimes h_{22}(x, y) + \dots + f_n(x, y) \otimes h_{2n}(x, y)$$

.....

$$i_n(x, y) = f_1(x, y) \otimes h_{n1}(x, y) + f_2(x, y) \otimes h_{n2}(x, y) + \dots + f_n(x, y) \otimes h_{nn}(x, y)$$

其中  $\otimes$  为卷积符号。该方程组可简化成如下图像恢复模型:  $i = Tf + N$ ,  $T$  为图像退化线性算子, 其元素为不同离焦量下的成像系统的点扩散函数的离散值<sup>[4]</sup>,  $N$  为噪音。根据图像恢复算法<sup>[5]</sup>, 各个断层的辐射出射度分布  $f(x, y)$  可以反演求得。

### 2 实验系统

实验系统包括光学平台、发光二极管、光学镜头、步进电机调焦系统、CCD 成像器件、图像卡、计算机处理和显示系统, 如图 2 所示。

假设把实际的三维发光体分成多层断层, 用光学平台上不同距离处的多排发光二极管来模拟。

采用两个不同相对孔径和焦距的光学透镜组合成景深在毫米量级的光学成像系统。成像器件采用彩色 CCD, 输出视频信号输出至图像卡送微机显示。用滤波片滤波得到单色辐射图。

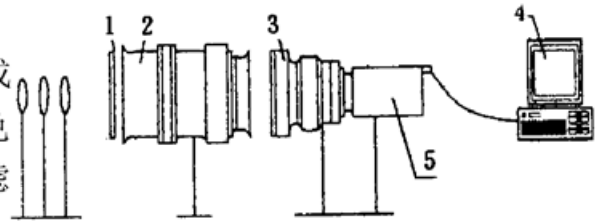


Fig. 2 The optical arrangement. 1: filter; 2, 3: two lens; 4: computer; 5: CCD

调焦用步进电机驱动镜头前后运动来进行, 计算机控制步进电机转动、图像摄取、图像处理等。

### 3 结果和讨论

对相距分别为 12 mm、6 mm、4 mm 的二排发光源的情况作了实验, 得出了比较好的结果。图 3 为摄取的二发光源相距 4mm 的二幅图像。图 3(a) 为聚焦于前排 1 获得的图像  $i_1$ , 可以看出前排 1 边缘清晰, 后排 2 边缘模糊; 图 3(b) 为聚焦于后排 2 获得的图像  $i_2$ , 可以看出后排 2 边缘清晰, 前排 1 边缘模糊。

图 4(a) 为反演后的第一断层的辐照度分布图, 图 4(b) 为反演后的第二断层的辐照度分布图。从图可看出, 第一断层只有一个明显的高峰, 位置在原发光源处。第二断层在原发光源处也只有一个明显的高峰。反演的结果符合实际情况。

原始图像的辐照度分布示于图 5。图 5(a) 为第一断层的原始辐照度分布, 图 5(b) 为第二断层的原始辐照度分布。从图中可看出反演后的图像和原始图像的辐照度分布极其相似。

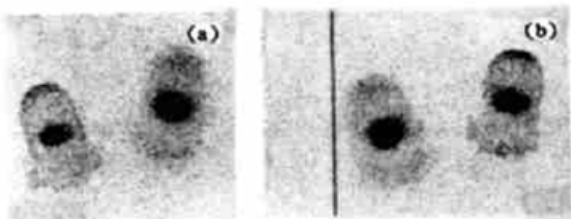


Fig. 3 Two captured images at two focusings

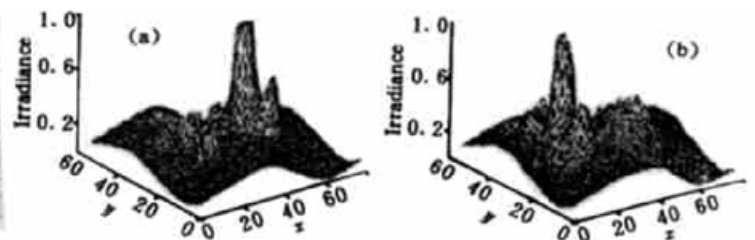


Fig. 4 The inversed irradiance profile of each section

如果用图像相关系数

$$C = \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i, j) \times b(i, j) \right] / \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i, j)^2 \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b(i, j)^2 \right]^{1/2}$$

[ $a(i, j)$ ,  $b(i, j)$ ] 分别为两幅图像的灰度值] 来表示反演后的图像和原始图像的相似程度, 则相关系数分别为 0.823、0.846。可见两幅图像反映的分布规律是基本一致的。

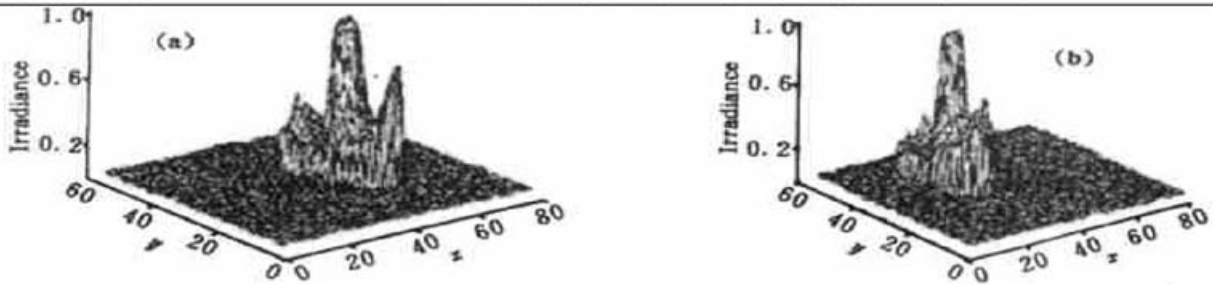


Fig. 5 The original irradiance profile of each section

**结 论** 提出了用一个摄像机直接测量三维发光体辐射场的新方法。本方法有以下特点:

1) 直接利用对象的辐射发光特性, 无需使用外光源; 2) 只用一个固定位置的 CCD 摄像机调焦层析摄像, 设备简单可靠; 3) 特殊设计的光学组合镜头使景深在毫米量级, 从而保证断层间隔也在毫米量级, 保证了该法与其他计算机层析技术有相同量级的高分辨率。

### 参 考 文 献

- [1] Merlaudeau F, *et al.*. Temperature imaging and image processing in the steel industry. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(12): 3470~ 3481
- [2] Snyder R, Hesselink L. Measurement of mixing fluid flows with optical tomography. *Opt. Lett.*, 1988, **27**(13): 87~ 91
- [3] Hertz H M, Faris G M. Emission tomography of flame radicals. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(5): 351~ 353
- [4] Stokseth P A. Properties of a defocused optical system. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **59**(10): 1314~ 1321
- [5] Castleman K R. 数字图像处理. 北京: 清华大学出版社, 1998.

## Irradiance Reconstruction for 3-Dimensional Luminous Body by Means of the Focusing Emission Computed Tomography

Lu Yonggang    Wang Shimin    Zhu Zhen    Lu Yong    Xu Yiqian  
(Thermal Energy Engineering Research Institute, Southeast University, Nanjing 210096)  
(Received 22 June 1998; revised 4 January 1999)

**Abstract** The Focusing Tomography is presented to reconstruct the 3-D radiation in a luminous body. The 3-D luminous body could be considered as the combination of many 2-D parallel luminous sections. Focus on each section by only one camera, a group of images will be captured which is the overlapped image of one focused image and other defocused images. The irradiances of these images form governing equations. The irradiance distribution of different sections could be induced from above equations. In this experiment, several light emitting diodes are employed to simulate several luminous sections. Results show that this method can reconstruct the irradiance of each section.

**Key words** 3-D luminous body, irradiance reconstruction, image reconstruction.