

一种新颖的诊断技术——光学层面分析

是度芳 肖旭东 唐川

(华中理工大学物理系)

本文介绍了一种适用于火焰、流体、等离子体、光纤棒等透明介质的无损诊断技术——光学层面分析(optical tomography)。这一诊断技术是利用激光和计算机技术对透明介质的某一层面进行积分测量,然后建立起该层面的折射率、温度、密度等特性的二维或三维图象。文章介绍了光学层面分析重构图象的原理和三种测量方法及其对应的计算公式,并讨论了这一方法的前景。

光学层面分析是一种高精度无损诊断技术。利用这一技术,在某一平面内对某一参数进行多角积分测量,就可以决定该参数在这一平面内的空间分布。这一技术与CT(computer tomography)技术有密切的关系。CT技术采用平行的X射线在多方位对人体的某一断面进行扫描,根据接收到的任一扫扫方向上的“投影”(吸收系数值)之和,即可重构出这一断面的清晰图象,重构图象是通过计算机进行的。光学层面分析是利用激光和计算机对透明介质的某一层面进行快速实时诊断,不仅可以重构出这一层面的象,而且可以绘制出有关参数的二维或三维图。光学层面分析特别适用于火焰^[1,2]和流动流体^[3,4]的诊断,可以实时地绘制出折射率、浓度、温度等参数的二维或三维分布图。与其它光学诊断方法如CARS、荧光光谱、拉曼散射、Mie散射和瑞利散射等比较,它兼有实时性、高精度、高空间和时间分辨率等优点。80年代,对它的研究取得了相当大的进展。这一诊断技术不仅在能源等民用工业上具有广泛的应用,而且在军事科学方面也有相当大的应用价值。这一技术还有一个特别的应用领域,即测量光纤^[5]或光纤棒^[6]层面折射率分布和外形。

光学层面分析可以分为两个过程:一是进行多方位扫描测量;二是重构图象。下面就这两个方面作一综合介绍。

一、光学层面分析的基本原理

吸收测量和发射测量早已用来定量地决定浓度和温度,其主要缺点是测量到的量是沿着某一射线的积分值,缺乏空间分辨能力。Abel变换虽然可以将一系列平行线的积分测量转变为参数的空间分布,但Abel变换有两个缺点:一是Abel变换只适用于轴对称分布的情况,这就大大地限制了其使用范围;二是在重构过程中的误差具有累加性,使得它在接近场中心时的误差达到相当大的程度。应用卷积技术的变换方法就可克服Abel变换的两个不足。光学层面分析重构图象中使用的计算方法就是在此

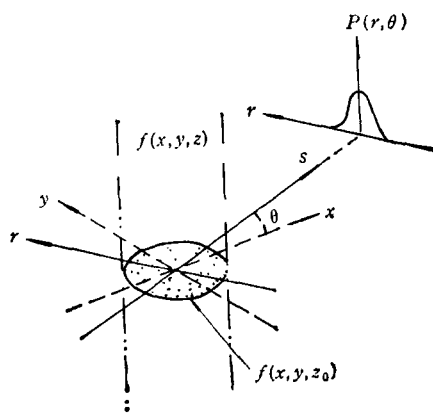


图1 用于层面图象重构的投影

基础上发展起来的卷积反投影算法。

设我们研究的客体为 $f(x, y)$, 如图 1 所示。在 $z = z_0$ 平面内测量通过客体的与 x 轴成 θ 角方向上的积分量 $P(r, \theta)$, 得到

$$P(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) ds, \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} s &= x \cos \theta + y \sin \theta, \\ r &= -x \sin \theta + y \cos \theta. \end{aligned}$$

我们把 $P(r, \theta)$ 定义为 $f(x, y)$ 在 θ 方向上的投影。对 $P(r, \theta)$ 进行傅里叶变换可得到谱函数

$$\begin{aligned} P(\omega, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} P(r, \theta) \exp(-i\omega r) dr \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(r, s) \exp(-i\omega r) dr ds. \end{aligned} \quad (2)$$

显然谱函数 $P(\omega, \theta)$ 就等于 $f(r, s)$ 的二维傅里叶变换 $F(\omega, \theta)$, 即

$$P(\omega, \theta) = F(\omega, \theta).$$

在 x, y 坐标系中,

$$F(\omega, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot e^{-i\omega(-x \sin \theta + y \cos \theta)} dx dy. \quad (3)$$

应用卷积定理及反变换运算, 很容易得到

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega, \theta) \cdot e^{i\omega(-x \sin \theta + y \cos \theta)} |\omega| d\omega \\ &= \int_0^\pi [P(r, \theta) * \Phi(r)] d\theta, \end{aligned} \quad (4)$$

$\Phi(r)$ 就是 $|\omega|$ 的傅里叶反变换。(4)式是卷积反投影积分。若能得到一系列的投影 $P(r, \theta)$, 则就可由(4)式重构出 $f(x, y)$ 。在实验中, 采用多角扫描测量来获得 $P(r, \theta)$ 解。如图 1 所示, θ 在 $0-\pi$ 范围内取 N 个方向, 每个方向上取与该方向平行的 M 条平行线, 这样就可以测得 $M \times N$ 个数据送入计算机, 计算机就根据一定程序建立 $f(x, y)$ 分布, 并作出二维或三维图象, 重构图象的计算可以采用本文卷积反投影变换, 也可以采用迭代法计算。

空间场分布 $f(x, y)$ 可以是某分子的浓度、温度或折射率, 投影 $P(r, \theta)$ 可以是光强或相位

等, 因此, 我们还必须建立 $f(x, y)$ 与 $P(r, \theta)$ 这两个物理量之间的关系。下面把这一关系结合测量方法一起介绍。 $P(r, \theta)$ 所代表的物理量或测量方法可以分为三类: 一是吸收测量^[7,8], 二是发射测量^[9], 三是相位测量^[11-13], 下面分别作一介绍。

二、吸收测量重构浓度和温度图象

采用吸收法测量时, 选择某种分子(i)的某条吸收谱线 ν 进行强度测量, 得到

$$I = I_0 e^{-\int N_i Q_\nu ds},$$

变换形式

$$-\ln \frac{I}{I_0} = \int_{-\infty}^{\infty} N_i Q_\nu ds = \int_{-\infty}^{\infty} K_\nu ds, \quad (5)$$

式中 N_i 为该分子的数密度, Q_ν 为该分子的吸收截面。十分明显, 吸收系数 K_ν 即为 $f(x, y)$ 场, $(-\ln \frac{I}{I_0})$ 即为投影 $P(r, \theta)$ 。只要多方位扫描测量强度, 就可得到吸收系数 K_ν 的分布场。建立浓度和温度场, 还必须建立浓度、温度与吸收系数 K_ν 间的关系。浓度和温度二者均不知的情况实际中是存在的, 针对这种情况我们采用谱线比例法来建立 T 与 K_ν 间的关系, 选用两条谱线进行测量, 并作比较,

$$\begin{aligned} \frac{K_{\nu 1}}{K_{\nu 2}} &= \frac{\nu_2}{\nu_1} \cdot \frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{f_1}{f_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right) \\ &= \frac{\nu_2}{\nu_1} \cdot \frac{(S_{J'J''} T_{J'J''})_1}{(S_{J'J''} T_{J'J''})_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

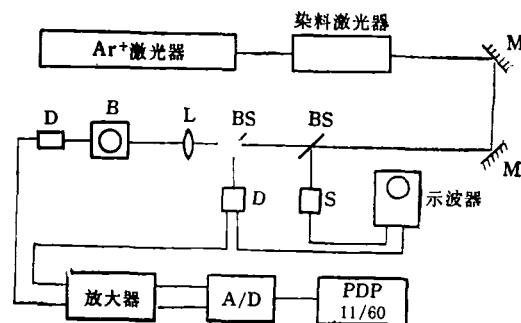


图 2 单光束吸收测量实验装置

BS——分束器; L——透镜; B——燃烧器;
D——信号接收器; S——光谱分析器; M——反射镜

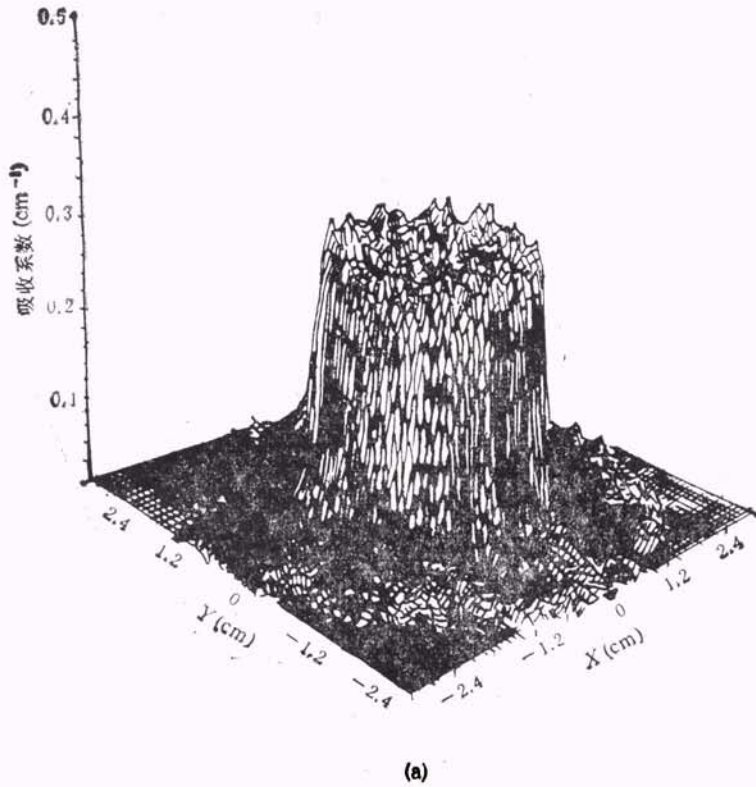


图 3(a) 吸收系数场的重构图象

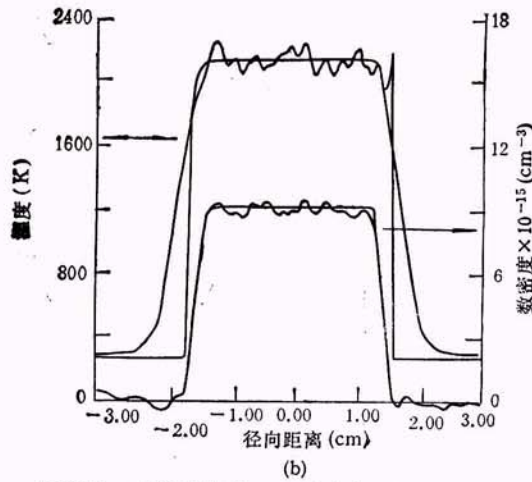


图 3(b) 与(a)对应的 OH 浓度和温度场图象的剖面对照

式中 g 为简并度, f 为振子强度, $S_{J'J''}$ 为转动跃迁几率, $T_{J'J''}$ 为振-转相互作用因子。各量均可在有关文献中查找, 而温度可由下式决定:

$$T = \frac{E_2 - E_1}{kT} \left\{ \ln \left[\frac{k\nu_1}{k\nu_2} \cdot \frac{\nu_1 (S_{J'J''} T_{J'J''})_2}{\nu_2 (S_{J'J''} T_{J'J''})_1} \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

由(5)式得到 K_{ν} 场后, 即可获得温度场。

知道了温度之后, 吸收截面 Q_{ν} 就可以通过计算得到。于是由 K_{ν} 、 Q_{ν} 就可以直接得到数密度 N_i 。

吸收测量重构图象的实验装置如图 2 所示。实验中必须使用调谐激光器, 以便使激光谱线调谐到分子的吸收区域。产生火焰的燃烧

器 B 既能转动也能平移, 以便能进行多方向的扫描测量。采集到的数据送入 PDP11/60 计算机, 进行实时重构图象。重构得到的三维 K , 见图 3(a), 根据图 3(a) 转换来的三维温度、密度图象的剖面(二维图象)见图 3(b)

三、发射测量重构密度图象

我们可以通过测量火焰中某种分子或基团的一条发射谱线的强度来重构密度分布场。例如选用 CH 基团 $A^2\Delta-X^2\Pi$ 跃迁 431nm 谱线, 测量到的光功率

$$P = CAh\nu V \frac{\Omega}{4\pi} n, \quad (8)$$

式中 C 为包括滤波器透射率和接收器效率在内的定标常数, A 为爱因斯坦发射系数, h 为普朗克常数, ν 为发射谱线频率, V 为象元体积, Ω 为接收立体角, n 为发射粒子数密度。实验装置如图 4 所示^[9]。图 4(a) 表示火焰转动, 连续接收。测量重构的密度图象见图 5。(8) 式中未知常数 C 和 Ω 可以采用原装置的瑞利散射来决定, 定标后所得到的火焰最大数密度约为 $5 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$ 。图 4(b) 装置仅测量三个投影, 由少数几个投影重构图象的计算应采用多重代数重构算法^[10]。

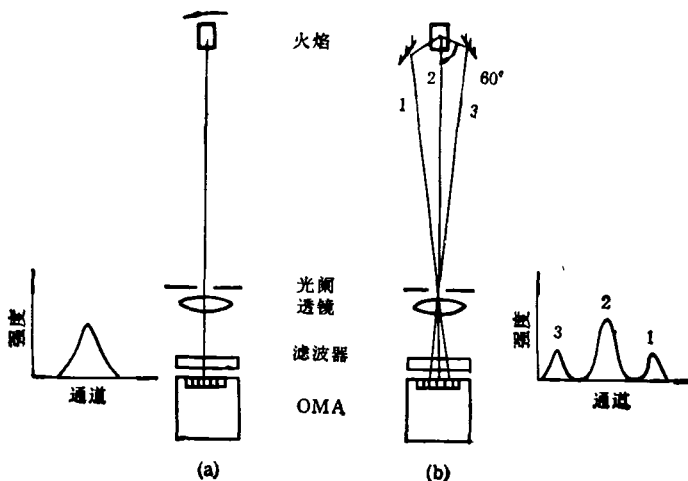


图 4 发射测量实验装置

(a) 连续记录投影; (b) 用 OMA 进行多道记录的三个投影

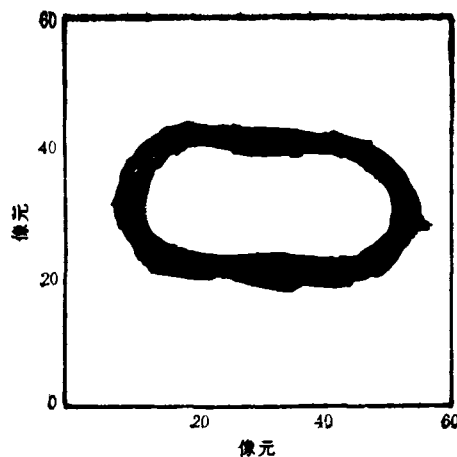


图 5 CH 发射层面重构图象

(采用预混甲烷-氧火焰, 层面接近燃器, 像元为 $120\mu\text{m} \times 120\mu\text{m}$, 八个连续投影)

采用吸收测量和发射测量进行光学层面分析, 不仅可以测量温度、浓度、折射率, 而且可以分析粒子成分及基团。由于包括 CH 产生机理在内的反应机理对温度有强烈的依赖性, 所以 CH 基团是火焰前沿极好的指示器, 这就很适合用它来监视和发现爆炸及燃烧过程。

四、相位测量重构折射率温度密度图象

在不均匀介质中, 由于温度密度的不均匀分布, 折射率也随之变化, 当光束在不同处穿过介质时产生的相位变化也就不同。因此, 可以通过相位测量来重构折射率、温度、密度图象。相位的测量有多种方法, 如干涉测量^[11]、全息测量^[12]、光束偏转测量^[2,3]和散射测量^[13]。下面主要介绍偏转测量。

激光束通过介质时产生的偏转情况如图 6 所示, 介质中的折射率分布为

$$n(x, y) = n_0[1 + \hat{n}(x, y)], \quad (9)$$

式中 n_0 为均匀背景折射率, $\hat{n}(x, y)$ 为归一化的局部折射率变量。运用高斯光束在缓慢变化介质中

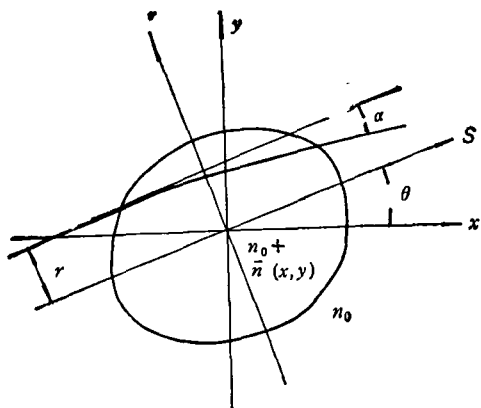


图6 光束偏转几何图

传播的知识^[11],并考虑偏转角度很小,故有 $\alpha \approx \text{tg } \alpha$,则

$$\alpha(r, \theta) = \int \frac{d\hat{n}(r, s)}{dr} ds. \quad (10)$$

再作一近似,即将光束轨迹看作是直线,则可将积分符号与求导符号易位,并对照(1)式,则有

$$\begin{aligned} \alpha(r, \theta) &= \frac{d}{dr} \int \hat{n}(r, s) ds \\ &= \frac{dP(r, \theta)}{dr}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$P(r, \theta) = \int \hat{n}(r, s) ds. \quad (12)$$

亦即 $f(x, y)$ 就是 $\hat{n}(x, y)$. 运用傅里叶变换的导数定理,就可得 $\alpha(r, \theta)$ 的傅里叶变换 $A(\omega, \theta)$ 与 $P(r, \theta)$ 的傅里叶变换 $F(\omega, \theta)$ 之间的关系

$$A(\omega, \theta) = i\omega F(\omega, \theta). \quad (13)$$

将(13)式与(14)式比较,就可得到

$$\begin{aligned} \hat{n}(x, y) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, \theta) \\ &\quad \cdot e^{i\omega(-x\sin\theta + y\cos\theta)} \frac{|\omega|}{\omega} d\omega \\ &= \int_0^\pi [\alpha(r, \theta) \cdot K(r)] d\theta. \end{aligned} \quad (14)$$

不过此处的 $K(r)$ 与(4)式中的 $\Phi(r)$ 不同, $K(r)$ 是 $\frac{|\omega|}{\omega}$ 的傅里叶反变换. 这样,就可以通过(9)式和(14)式,利用测量偏转角来重构折射率分布 $n(x, y)$.

物理

密度 ρ 可由折射率 $n(x, y)$ 计算得到^[12]

$$\rho = k(n - 1), \quad (15)$$

式中 k 为常数. 温度与折射率成反比,所以得到折射率场 $n(x, y)$ 以后,即可得到密度场 $\rho(x, y)$ 和温度场 $T(x, y)$. 利用光束偏转测量重构图象的实验装置见图7^[5]. 流体或火焰由步进电机带动旋转, θ 在 $0-\pi$ 范围内均匀地取28个方位. 另一步进电机带动它移动扫描,每个方位上取120个投影,整个实验共测得3360个投影用于重构 $n(x, y)$. 这样得到的分辨率相当高. 为了提高测量密度,接收器用光电二极管阵列,图7中的计算机为PDP11/60,既可用于进行图象重构计算,也可用来控制两个步进电机.

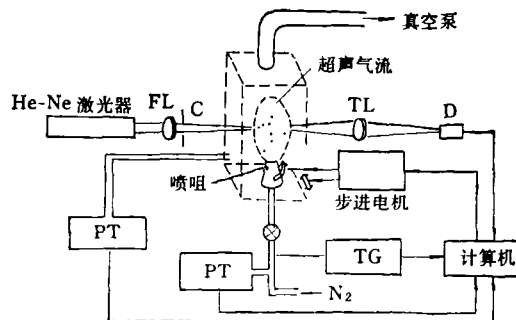


图7 超声气流的光束偏转测量实验装置图

全息测量和干涉测量可以采用多光束一次测量,因此它采集数据所用的时间可以很短,故可以实现快速测量,提高时间分辨率. 火焰、流体等因波动较频,所以特别适宜采用这种测量方法,但是它需要条纹计数. 而偏转法测量简便,更适用于光纤棒等一类的固体介质.

就 tomography 技术来讲,不仅有用于生物系统的 CT, 用于透明介质的 optical tomography, 而且在地质矿产部门也有应用. 就本文介绍的光学层面分析来讲,它适用于一切透明介质,如火焰、流体、光纤、等离子体等. 由于采用了激光和计算机技术,使这一诊断技术具有鲜明的特点: 实时性, 三维图象具有的直观性, 高精度, 在线测量. 为了使这一技术具有更

(下转第 518 页)