

# 基于激光吸收光谱技术的燃烧场气体温度和浓度二维分布重建研究\*

宋俊玲<sup>†</sup> 洪延姬 王广宇 潘虎

(装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

(2012年5月18日收到; 2012年7月9日收到修改稿)

基于可调谐半导体激光吸收光谱技术和代数迭代算法 (ART) 实现燃烧场温度和浓度二维分布重建. 采用时分复用技术, 在 1 kHz 扫描频率下分别扫描  $\text{H}_2\text{O}$  的两条吸收谱线,  $7205.25$  和  $7416.05 \text{ cm}^{-1}$ , 对温度分布在  $300\text{--}1100 \text{ K}$  范围内的气体温度场进行了重建. 研究了投影角度和投影光线数目对温度场和浓度场重建结果的影响, 并将温度场重建结果与热电偶测量结果进行比较, 结果表明, 采用四个投影方向时, 温度场重建结果与热电偶测量结果除中心低温区域外基本符合. 当光线数目减少时, 通过在两条光线间增加虚拟光线, 代入到迭代算法中, 增加光线数目, 提高了温度场和浓度场的重建效果. 但此方法受到燃烧场温度梯度大小的影响, 即在两条光线之间气体温度梯度较大, 增加虚拟光线提高温度场重建效果不明显.

**关键词:** 可调谐半导体激光吸收光谱, 温度场二维重建, 浓度场二维重建, 代数迭代算法

**PACS:** 07.65.G, 42.25.B

## 1 引言

可调谐二极管激光吸收光谱技术 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 具有高灵敏度、快时间响应、非接触测量等优点, 可实现对燃烧场和推进流场温度、组分浓度和质量流量的实时测量. 目前 TDLAS 传感器已在航空发动机进气道<sup>[1]</sup>、超然冲压发动机隔离段/燃烧室<sup>[2,3]</sup> 等的流场诊断中获得广泛应用.

由于 TDLAS 本质是视线测量 (沿路径积分本性) 技术, 对于非均匀分布流场, 通过两条谱线得到光路径上平均温度的方法不再适用. 为获得流场的内部信息, 一种方法是在同一路径扫描多条谱线以拓展谱线包含的信息, 以获得光路径上各温度段所占的比重, 但是还不能得到温度随位置的分布信息<sup>[4-8]</sup>. 另一种是将吸收光谱技术与图像重建技术相结合得到被测区域的内部信息, 即确切的

空间分布情况, 可以实现对温度和气体组分浓度二维分布测量<sup>[9-15]</sup>, 本文主要是基于此方法开展的研究.

Busa 等<sup>[10]</sup> 利用滤波反投影方法, 由 72 个扇形光束共 1800 条光线对被测区域进行  $360^\circ$  投影, 重建了高超声速发动机燃烧段出口平面温度和  $\text{H}_2\text{O}$  的浓度二维分布, 并结合 PIV 测量流场内速度, 计算了燃烧场燃烧效率. Kasyutich 等<sup>[11]</sup> 将圆形和矩形加热器相结合, 基于代数迭代算法 (ART) 采用 5 个投影角度共 55 条光线重建了非轴对称分布的温度场. 严建华等<sup>[12,13]</sup> 在对  $\text{NH}_3$  测量实现烟道截面气体分布图像重建研究中, 直接使用 4 个高速旋转台并联运行, 实现同步扫描被测区域. 虽然增加了激光器和探测器的个数, 但大大减少了测量时间. 李宁等<sup>[9,13]</sup> 对 ART 中松弛因子进行修正, 提出修正自适应代数迭代法 (MAART), 有效提高了重建结果的精确度. Ma 等<sup>[14,15]</sup> 采用激光器单次扫描多条谱线, 基于模拟退火算法重建了气体温度场

\* 国家自然科学基金 (批准号: 90916015) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: songjl@mail.ustc.edu.cn

和浓度.

本文通过扫描 H<sub>2</sub>O 的两条吸收谱线, 基于自适应迭代算法采用 4 个角度投影实现了燃烧场温度和气体组分浓度二维分布重建. 通过在两条光线中间增加虚拟光线的方法提高了温度场和浓度场的重建精度.

## 2 基本原理

### 2.1 吸收光谱技术原理

利用可调谐二极管激光器扫描气体的特征吸收光谱测量气体温度和浓度, 根据 Beer-Lambert 定律

$$\ln \left( \frac{I_t}{I_0} \right) = -PS_{\nu_i}(T)\Phi(\nu)\chi L, \quad (1)$$

其中  $P$  为气体总压,  $\chi$  为待测气体组分浓度,  $\Phi(\nu)$  为线型函数,  $S_{\nu_i}(T)$  为所用谱线  $\nu_i$  在温度  $T$  时的谱线强度.

谱线强度随温度的变化可以表示为

$$\begin{aligned} S_{\nu_i}(T) = & S_{\nu_i}(T_0) \frac{Q(T_0) T_0}{Q(T) T} \\ & \times \exp \left[ -\frac{hcE''}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \\ & \times \left[ 1 - \exp \left( -\frac{hcv_0}{kT} \right) \right] \\ & \times \left[ 1 - \exp \left( -\frac{hcv_0}{kT_0} \right) \right]^{-1}, \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $S_{\nu_i}(T_0)$  为在参考温度  $T_0 = 296$  K 时的谱线强度, 其大小可以通过 HITRAN 光谱数据库 [16] 得到.  $E''$  为低跃迁能态能量,  $h$  为 Planck 常数,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $c$  为光速,  $Q(T)$  为温度  $T$  时的配分函数值, 一定温度范围内的配分函数可以用多项式表示 [17].

TDLAS 测温是根据两条谱线的强度随温度变化的特性不同. 吸收谱线的强度比值  $R$  可表示为

$$\begin{aligned} R = & \frac{S_{\nu_1}(T)}{S_{\nu_2}(T)} \\ = & \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \exp \left( -\left( \frac{hc}{k} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\times (E''_1 - E''_2) \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (3)$$

被测区域温度  $T$  可以通过 (2) 和 (3) 式表示为

$$\begin{aligned} T = & \frac{\frac{hc}{k}(E''_2 - E''_1)}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc(E''_2 - E''_1)}{kT_0}}, \\ \frac{A_1}{A_2} = & \frac{\int P_{\text{abs}} L \Phi_{\nu_1} \chi S_1(T) d\nu}{\int P_{\text{abs}} L \Phi_{\nu_2} \chi S_2(T) d\nu} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中  $A$  为积分吸收系数, 温度灵敏度为谱线强度比值  $R$  的相对变化量与对温度  $T$  的相对变化的比值

$$\left| \frac{\partial R/R}{\partial T/T} \right| = \left( \frac{hc}{k} \right) \frac{|(E''_1 - E''_2)|}{T}. \quad (5)$$

利用两线直接吸收法测量温度场, 在谱线的选择上, 文献 [17, 18] 做了详细的讨论. 可以概括为以下基本原则: 1) 谱线为 1.3—1.5  $\mu\text{m}$  的近红外光谱区; 2) 依据被测对象谱线对有较强的吸收以保证有较高的信噪比; 3) 尽量减少临近谱线的干扰. 本文中 被测区域可以分为两个部分, 一为室温区域, 约为 294 K, 二为燃烧区域, 约为 1000 K. 本文选择谱线 7416.05 和 7205.25  $\text{cm}^{-1}$ , 吸收线强度和温度灵敏度随温度的变化如图 1 所示.

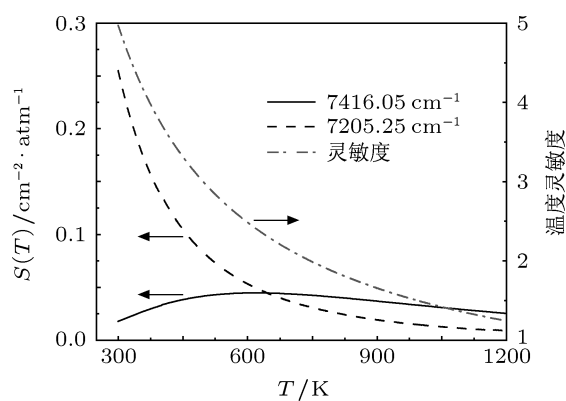


图 1 吸收强度和温度灵敏度随温度的变化

谱线参数如下表所示, 其中谱线 2 旁边左右约 0.4  $\text{cm}^{-1}$  分别有旁线 2A 和 2B, 随着温度的升高, 谱线 2A 和 2B 不能忽略, 所以实验中采用三峰 Voigt 线型拟合.

表 1 实验中采用的 H<sub>2</sub>O 吸收谱线 [16]

谱线号	频率 /cm <sup>-1</sup>	吸收强度 296 K/(cm <sup>-2</sup> /atm)	低能态能级 /cm <sup>-1</sup>
1	7205.25	2.29 × 10 <sup>-1</sup>	79
2	7416.05	1.50 × 10 <sup>-2</sup>	1115
2A	7415.60	1.30 × 10 <sup>-2</sup>	137
2B	7416.35	3.44 × 10 <sup>-3</sup>	1080

## 2.2 气体温度场、浓度场二维重建

基于 TDLAS 的迭代算法重建气体温度场和浓度场, 首先将待测区域进行离散化, 重建的分布图像  $f(x, y)$  离散成  $N = n \times n$  的网格, 假定被测气体在每个方格内的温度和组分浓度不变, 当波长为  $\nu_m$  的激光射线  $i$  穿过测量区域时, 被测气体吸收, 从而强度发生衰减, 对于激光束  $i$ , 其气体吸收方程可以写成

$$A_{\nu m, i} = \sum_{j=1}^N f_{\nu_1, j} L_{ij} = \sum_{j=1}^N [PS(T)\chi]_{\nu_1, j} L_{ij}, \quad (6)$$

其中激光束  $i$  穿过网格  $j$  的距离  $L_{ij}$  不随测量场中气体温度、浓度等参数的变化, 只与入射激光束的角度和位置相关, 表示为方程

$$\begin{aligned} L_{11}f_1 + L_{12}f_2 + \cdots + L_{1N}f_N &= A_1, \\ L_{21}f_1 + L_{22}f_2 + \cdots + L_{2N}f_N &= A_2, \\ &\vdots \\ L_{M1}f_1 + L_{M2}f_2 + \cdots + L_{MN}f_N &= A_M, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $M$  为总投影光线数目. 将上述方程写成矩阵形式

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{F}, \quad (8)$$

其中  $\mathbf{A}$  为投影向量, 通过实验测量得到,  $\mathbf{F}$  为气体参数向量, 是离散化网格的未知量. 由于一条光束最多能穿过离散网格数为  $2n - 1$ , 大多数  $L_{ij}$  均为 0, 只有极少数的网格单元对  $A_{\nu_1, i}$  的投影值有贡献. 在计算过程中, 假设每个网格内气体参数为定值, 所以将被测区域离散化网格越多, 被测区域将被刻画的越细致.

本文采用代数迭代算法, 求解表达式可以写为 [19]

$$\mathbf{f}^{(k)} = \mathbf{f}^{(k-1)} - \alpha \frac{(\mathbf{f}^{(k-1)} \cdot \mathbf{L}_i - A_i)}{\sum_{j=1}^N |L_{ij}|^2} \mathbf{L}_i, \quad (9)$$

其中  $k$  为迭代次数, 由于 ART 算法中收敛速度慢, 且松弛因子  $\alpha$  一般为常数, 不能反映当前网格信息, 采用文献 [13] 的修正 ART(MAART) 算法, 将吸收强度引入到迭代关系中, 对松弛因子进行修正, 将方程 (9) 改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{f}^{(k)} &= \mathbf{f}^{(k-1)} - \alpha_k (\mathbf{f}^{(k-1)} \cdot \mathbf{L}_i - A_i), \\ \alpha_k &= \beta \times \frac{f_j^{(k-1)} L_{ij}}{\sum_{j=1}^N f_j^{(k-1)} L_{ij}}. \end{aligned} \quad (10)$$

在 ART 算法中, 为保证算法收敛, (9) 式中的  $\alpha$  取值范围为 0—2, 在本文迭代重建算法中, (10) 式中  $\beta$  取值为 0.25. 由于温度场和浓度场均为正值, 在迭代过程中加入非负性限制 [19], 即

$$[\Phi(f)]_j = \begin{cases} f_j, & f_j \geq 0, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases}$$

$$\mathbf{f}^{(k)} \leftarrow \Phi(\mathbf{f}^{(k-1)} - \alpha_k (\mathbf{f}^{(k-1)} \cdot \mathbf{L}_i - A_i)). \quad (11)$$

同时, 为减弱重建区域相邻点突变响应, 采用平滑处理机制 [13,14], 对于网格  $(m, n)$ , 可以写成

$$\begin{aligned} f_{(m,n)}^k &= (1 - \delta) \times f_{(m,n)}^{(k-1)} \\ &+ \delta \times \left( \sum_{y=n-1}^{n+1} \sum_{x=m-1}^{m+1} f_{(x,y)}^{(k-1)} / 8 \right). \end{aligned} \quad (12)$$

第  $k$  次迭代得到的网格信息  $f_{(m,n)}^k$  不仅与第  $k - 1$  次迭代的网格信息相关, 还与相邻 8 个网格的信息相关. 计算中  $\delta$  取 0.001.

## 3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 实验系统包括激光源、光学系统、燃烧装置和数据采集处理系统. 被测量区域为 33 cm × 33 cm, 其中包括燃烧炉炉面圆形区域, 区域直径为 14 cm, 炉面中心具有直径为 3 cm 开孔, 光线距离炉面高度为 1 cm.

首先由数据采集卡 (NI, PCI-6115) 先后产生两路用以调制的电压信号, 分别输入给两个激光控制器 (ILX, LDC-3908; THORLABS, ITC502), 两个控制器分别控制两个 DFB 半导体激光器 (NEL) 的扫描电压、温度和中心电流, 两个激光器的中心电流均为 70 mA. 2 个激光器输出激光经过  $2 \times 1$  光纤耦合器, 再经过  $1 \times 2$  光纤分路器, 其中一路经过待测燃烧场后由多模光纤接收并将光信号传输给探测器 (InGaAs,  $\phi 3$  mm) 接收, 另外一束光经过自由光谱范围 (FSR) 为 1.5 GHz 的标准具

(THORLABS, SA200-12A) 用以校准, 探测器信号由数据采集卡记录并存储. 通过调制信号控制两个激光器交替扫描, 扫描频率为 1 kHz. 燃气炉固定在步进电机上, 移动步长为 0.5 cm. 为减小实验测量中的误差, 将 10 个周期的采集数据进行平均处理得到 10 组数据, 然后将这 10 组数据分别利用 Voigt 线型拟合计算面积, 并再次平均以减少拟合带来的误差, 最后得到两条吸收谱线对应的吸收面积. 将炉面旋转  $90^\circ$ , 利用相同方法采集数据.

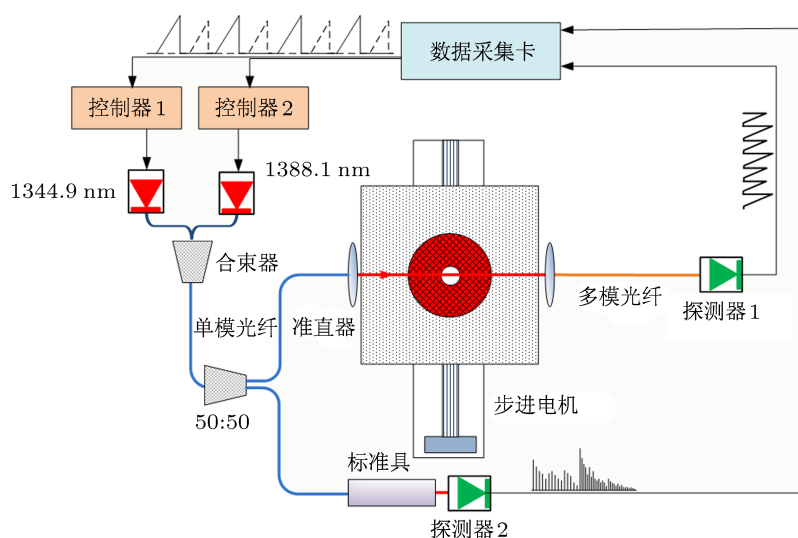


图 2 实验装置图

## 4 实验测量结果

### 4.1 谱线拟合

由于在常温下谱线  $7205.25 \text{ cm}^{-1}$  的吸收强度较大, 标准具透射光在吸收处很弱, 改变激光器温度使得激光频率偏离吸收线位置, 以获得足够信噪比的信号. 采集结果如图 3 所示. 标准具数据采用三次样条插值拟合获得激光相对频率随时间的变化关系.

实验结果采用 Voigt 线型拟合谱线, 谱线 2 采用三峰拟合计算面积, 拟合结果及偏差如图 4 所示.

### 4.2 温度场和浓度场重建结果

实验被测对象为红外燃气炉, 炉面直径为 14 cm, 炉面中心具有 3 cm 圆孔, 温度较炉面

温度低约 300 K, 燃气炉燃烧场温度和浓度分布模型如图 5 所示. 模型中炉面温度为 1100 K, 炉面中心叠加倒 Gauss 函数, 温度呈下降分布, 温度过渡区采用正弦函数模拟, 确保温度的一阶导数连续, 过渡区长度为 5 cm. 浓度分布为 0.5%—4%.

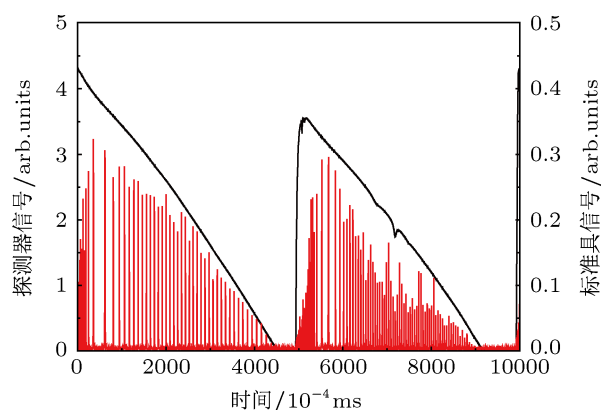


图 3 探测器信号与标准具信号

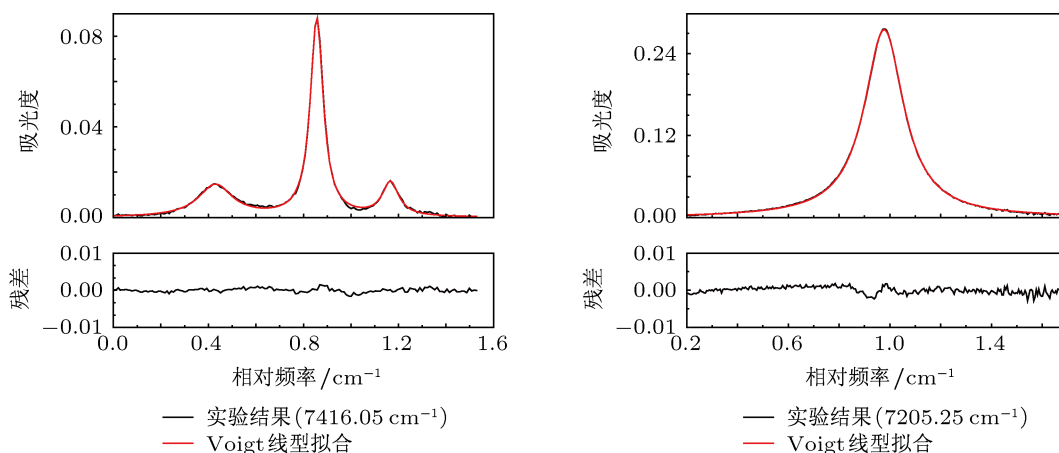


图4 两条吸收谱线 Voigt 拟合结果 ( $x = 9.5 \text{ cm}$ )

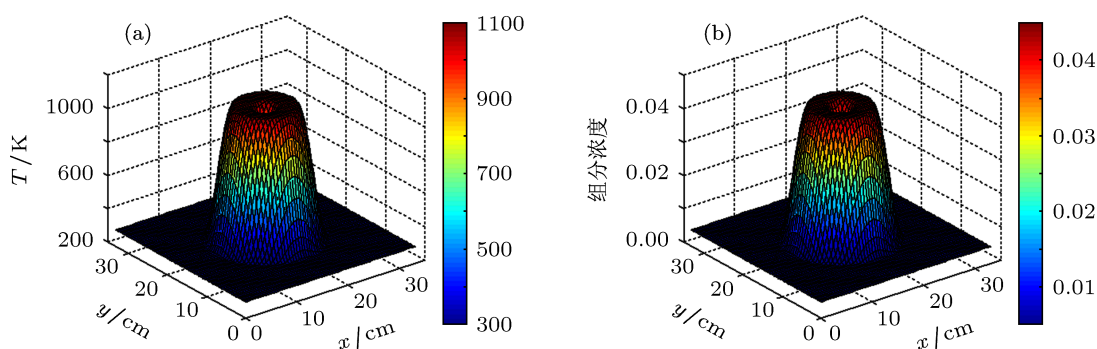


图5 计算模型 (a) 温度分布; (b) 浓度分布

由于热电偶测量相应时间的限制, 不可能测量出整个二维温度场的每个区域, 实验中只使用热电偶测量  $y = 0$ , 沿  $x$  轴方向上的温度分布。

实验中燃烧场压强  $P = 1 \text{ atm}$  ( $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ), 由 (6) 式可知, 每个离散网格内  $S(T)\chi$  为不变量, 定义与吸收谱线  $\nu_i$  对应的吸收系数相对误差  $e_{\nu_i, \text{TS}}$  为

$$e_{\nu_i, \text{TS}} = \frac{\sum_m \sum_n |S_{\nu_i}(T_{m,n}^*)T_{m,n}^* - S_{\nu_i}(T_{m,n}^{\text{cal}})T_{m,n}^{\text{cal}}|}{\sum_m \sum_n |S_{\nu_i}(T_{m,n}^*)T_{m,n}^*|}, \quad (13)$$

其中  $T_{m,n}^*$  为设定模型温度分布,  $T_{m,n}^{\text{cal}}$  为利用实验数据计算得到结果,  $S_{\nu_i}$  为对应吸收线的吸收强度。

采用  $0^\circ$  和  $90^\circ$  投影, 每个投影角度内光线数目为 67 条. 两条谱线相对误差  $e_{\text{TS}}$  随迭代次数的变化如图 6 所示. 由图 6 可知, 随着迭代次数的增加  $e_{\text{TS}}$  迅速下降后保持稳定, 说明计算结果趋于

收敛. 两条谱线的相对误差分别为 0.54 和 0.18, 从图 7 的温度场和浓度场重建二维结果可以看出, 沿着投影方向, 重建图像有明显的凸起, 是由于只有两个方向投影, 投影方程数目较少, 不能完全反映出原始温度场和浓度场。

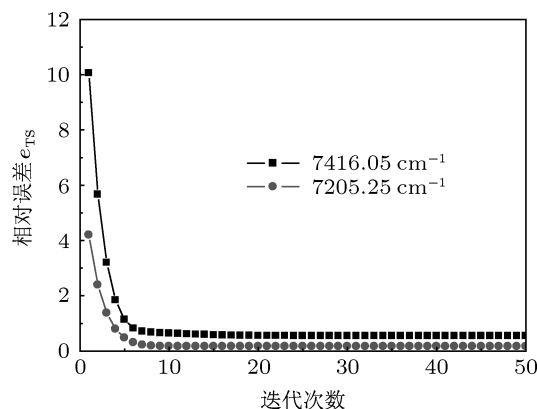


图6 相对误差随迭代次数的变化 ( $7416.05 \text{ cm}^{-1}$ ,  $7205.25 \text{ cm}^{-1}$ )

为了获得较好的重建结果,基于 0 和 90° 实验结果计算增加 45° 和 135° 两个投影方向,为保证在 45° 和 135° 投影中被测区域边缘仍有光线穿过,光线数目增加为 97 条,第一条光线与最后一条光线间距为 48 cm,并且超出被测区域的投影面积记为 0. 图 8 给出 4 个角度投影时,温度场和浓度场的重建结果.

从图 8 可知,重建结果较两角度投影结果有明显提高,图 9 给出  $y = 0$ , 沿  $x$  方向温度分布和热电偶测量结果,热电偶测量温度偏差在 5%. 图 9 中可知,当只有两个方向投影时,中心温度明显较实际测量结果偏低,两侧低温区域较热电偶测量结果偏高,这是由于采用两方向投影时,由 (9) 式可以看出,每个网格只有两条光线穿过(水平方向和垂直方向)并且穿过长度均为‘1’,导致中心高温区被抹平,低温区温度被提升. 当采用四个方向投影时,中心空洞的低温区并没有热电偶测量结果明显,由

于在迭代过程中采用了平滑机理抑制迭代过程中的突变,同时,也削弱了实际温度场的温度梯度.

在实际燃烧场测量中,由于环境的限制,不可能布置较多的光线,仍采用 4 个投影方向,研究光线数目对重建结果的影响. 此外,我们提出虚拟光线的方法,即在两条光线之间增加 1 至 2 条虚拟光线,虚拟光线穿过每个网格的权值即新的投影矩阵  $L$ , 通过光线在二维空间中的位置计算得到,光线的投影面积由相邻两条实际光线加权得到. 即

$$A_{i_1} = \frac{1}{2}(A_i + A_{i+1})$$

或

$$\begin{aligned} A_{i_1} &= \frac{2}{3}A_i + \frac{1}{3}A_{i+1}, \\ A_{i_2} &= \frac{1}{3}A_i + \frac{2}{3}A_{i+1}, \end{aligned} \quad (14)$$

公式分别为增加 1 条和 2 条虚拟光线投影面积的计算.

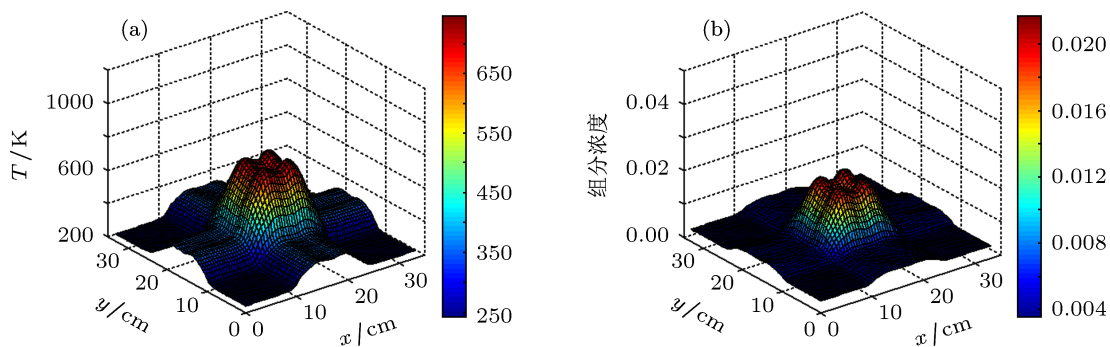


图 7 重建结果 (0 和 90° 方向投影) (a) 温度场; (b) 浓度场

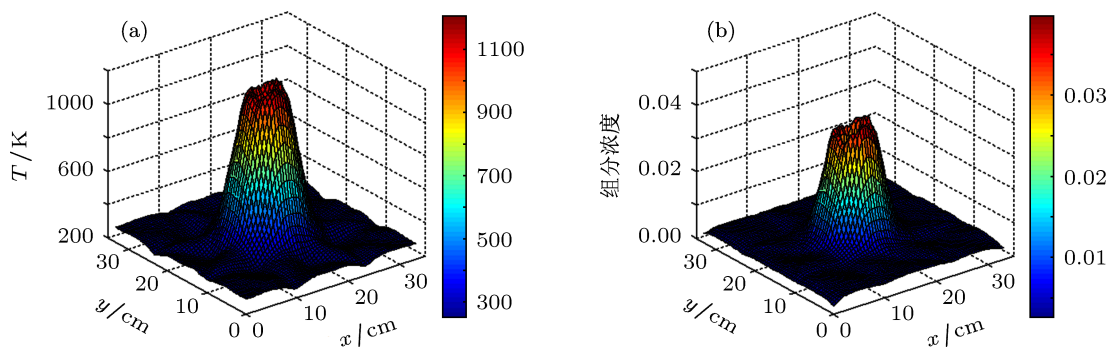


图 8 重建结果 (0, 45°, 90° 和 135° 方向投影) (a) 温度场; (b) 浓度场



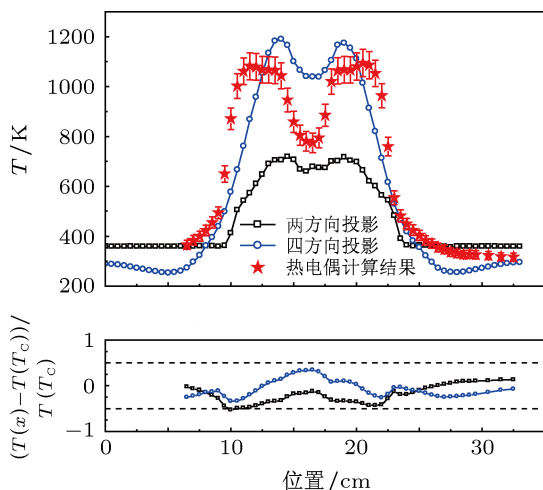


图9 温度场重建结果和热电偶测量结果 (沿  $x$  轴方向,  $y = 0$ )

以每个投影角度有 97 条光线为基准, 分别计算光线数目为 49 和 33 条以及采用虚拟光线法后, 温度场和浓度场的重建结果. 图 10 和图 11 分别给出了  $y = 0$ , 沿  $x$  方向温度和浓度分布结果. 其中实心符号代表真实光线重建结果, 空心符号代表采用虚拟光线方法重建结果. 从图 10 中可以看出, 当光线数目减少时, 高温区温度场和浓度场重建结果较  $p = 97$  时结果偏低, 当采用虚拟光线法时, 在 49 条光线基础上加入 48 条虚拟光线, 与  $p = 97$  时相对  $p = 97$  时偏差明显降低. 但是当实际光线只有 33 条, 加入 64 条虚拟光线时, 中心区域最大偏差为 40%, 这是由于中心处温度梯度大, 虚拟光线投影的吸收面积是通过实际光线加权得到, 对应出反算出的温度场中心低温区域较  $p = 97$  时高, 相对偏差增大, 说明虚拟光线方法较适用于气体温度场无较大的梯度条件下.

### 5 结论

采用自适应的代数迭代算法, 利用时分复用技术扫描  $H_2O$  的 2 条特征谱线, 实现了燃烧场气体温度和浓度二维分布重建. 研究了投影角度和投影光线数目对重建结果的影响, 提出了虚拟光线算法.

结果表明, 只有两个方向投影时, 温度分布和浓度分布重建结果受到迭代误差的影响较大, 采用四个投影方向时, 温度场重建结果与热电偶测量结果基本符合. 当光线数目减少时, 通过在两条光线间增加虚拟光线, 增加光线数目, 提高了温度场和浓度场的重建效果. 下一步工作将在如何优化光线空间布置, 减少光线数目, 提高气体二维分布重建精度方面展开.

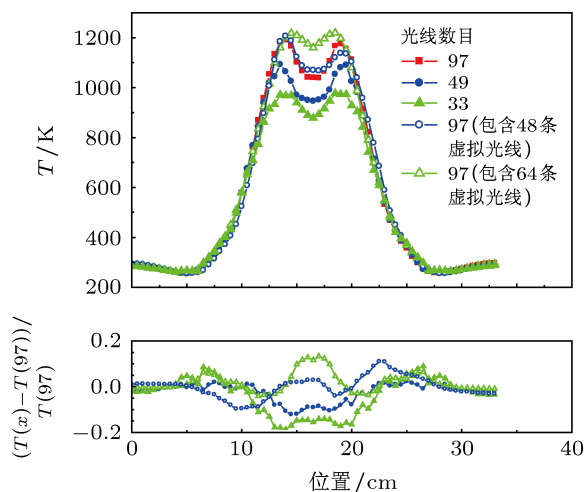


图10 温度场重建结果 (每个投影角度光线数目分别为 97, 49 和 33, 沿  $x$  轴方向,  $y = 0$ )

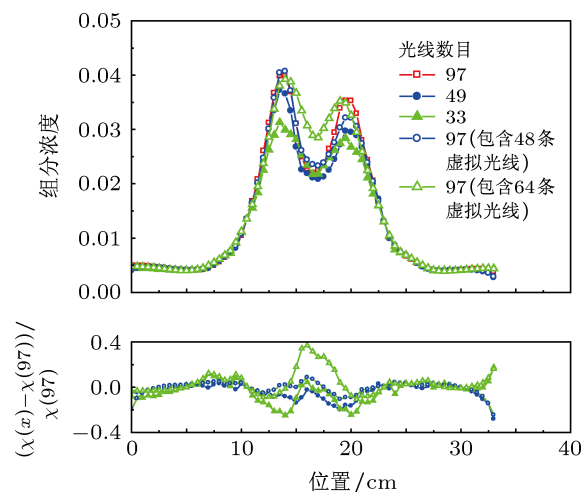


图11 浓度场重建结果 (每个投影角度光线数目分别为 97, 49 和 33, 沿  $x$  轴方向,  $y = 0$ )

- [1] Brown M S 2012 *50th AIAA Aerospace Science Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Nashville, Tennessee, January 09–12, 2012
- [2] Jackson K R, Gruber M R, Buccellato S 2011 *17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, San Francisco, California, April 11–14, 2011
- [3] Lindstrom C D, Jackson K R, Williams S 2009 *AIAA J.* **47** 2368
- [4] Liu J T C, Rieker G B, Jeffries J B, Gruber M R, Carter D C, Mathur T, Hanson R K 2005 *Appl. Opt.* **44** 6701
- [5] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *AIAA J.* **45** 411
- [6] Lyle K H, Jeffries J B, Hanson R K, Winter M 2007 *AIAA J.* **45** 2213
- [7] Yu X, Li F, Chen L 2010 *Acta Mech. Sin.* **26** 147
- [8] Lou N, Li N, Wen C 2012 *Spectrosc. Spec. Anal.* **32** 1329 (in Chinese) [娄南征, 李宁, 翁春生 2012 光谱学与光谱分析 **32** 1329]
- [9] Li N, Wen C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6914 (in Chinese) [李宁, 翁春生 2010 物理学报 **59** 6914]
- [10] Busa K M, Bryner E, McDaniel J C, Goynes C P, Smith C T 49th *AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, Florida City, January, 4–7, 2011
- [11] Kasyutich V L, Martin P A 2011 *Appl. Phys. B* **102** 149
- [12] Wang F, Cen K F, Li N 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 1
- [13] Li N, Weng C 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 061201
- [14] Ma L, Cai W 2008 *Appl. Opt.* **47** 4187
- [15] Ma L, Cai W W, Caswell A W, Kraetschmer T, Sanders S T, Roy S, Gord J R 2009 *Opt. Express* **17** 8602
- [16] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, Benner D C, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Champion J P, Chance K, Coudert L H, Dana V, Devi V M, Fally S, Flaud J M, Gamache R R, Goldman A, Jacquemart D, Kleiner I, Lacombe N, Lafferty W J, Mandin J Y, Massie S T, Mikhailenko S N, Miller C E, Moazzen-Ahmadi N, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V I, Perrin A, Predoi-Cross A, Rinsland C P, Rotger M, Šimečková M, Smith M A H, Sung K, Tashkun S A, Tennyson J, Toth R A, Vandaele A C, Vander Auwera J 2009 *J. Quant. Spectrosc. RA* **110** 533
- [17] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, Hanson R K 2003 *Meas. Sci. Technol.* **14** 1459
- [18] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K 2005 *Appl. Phys. B* **81** 711
- [19] Hansen P C, Hansen M S 2012 *J. Comput Appl. Math.* **236** 2167



# Two-dimensional reconstructions of gas temperature and concentration in combustion based on tunable diode laser absorption spectroscopy\*

Song Jun-Ling<sup>†</sup> Hong Yan-Ji Wang Guang-Yu Pan Hu

(State Key Laboratory of Laser Propulsion and Applications, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

(Received 18 May 2012; revised manuscript received 9 July 2012)

## Abstract

Based on the tunable diode laser absorption spectroscopy, the combustion gas concentration and temperature distribution are reconstructed using algebraic iterative reconstruction technique (ART). Time division multiplexing technology is adopted to scan two H<sub>2</sub>O absorption transitions (7205.25 cm<sup>-1</sup> and 7416.05 cm<sup>-1</sup>) simultaneously at 1 kHz repetition rate. The influences of projected angle and the number of beams on the temperature and concentration field reconstruction are studied. Compared with the thermocouple readings, the temperature distribution reconstruction has a well agreement except a low temperature area in the middle of the combustion field. Aiming to achieve an optimal reconstruction with a limited number of beams, a few virtual beams are added to the ART method. Through this method, the effectivenesses of temperature and concentration field reconstructions increase, but there is not an obvious improvement when a large gradient of temperature exists between two lines.

**Keywords:** tunable diode laser absorption spectroscopy, two-dimensional temperature reconstruction, concentration reconstruction, algebraic reconstruction technique (ART)

**PACS:** 07.65.G, 42.25.B

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 90916015).

<sup>†</sup> E-mail: songjl@mail.ustc.edu.cn