

# 基于光谱拟合的燃烧场气体参数测量方法研究

屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 王明东

航天工程大学激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416

**摘要** 基于波长调制光谱(WMS)理论,提出一种利用光谱拟合实现燃烧场气体参数测量的方法;通过拟合谱线的谐波信号实现谱线积分吸光度、多普勒线宽和碰撞线宽的测量,进而实现燃烧场内气体温度、压强和水蒸气浓度的测量;通过数值仿真研究了积分吸光度和碰撞线宽对谐波信号的影响,并在样品池中进行实验研究。结果表明:谐波信号光谱对积分吸光度的灵敏度约为 1,而对碰撞线宽的灵敏度则随碰撞线宽增大而先增大后基本不变;光谱拟合测量方法具有较高的测量精度,气体温度、压强、水蒸气物质的量分数的测量值与预测值的最大相对偏差分别小于 4%、6%、5.5%。

**关键词** 光谱学; 气体参数测量; 光谱拟合; 波长调制光谱; 积分吸光度; 燃烧场

**中图分类号** O433.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1230001

## Measurement Method for Gas Parameters in Combustion Flow Based on Spectroscopy Fitting

Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, Wang Mingdong

State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Space Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** Based on wavelength modulation spectroscopy (WMS) theory, a measurement method for gas parameters in combustion flow is put forward using spectroscopy fitting. Taking advantage of fitting harmonic signals of spectral lines, the integral absorbance, Doppler width, and collisional width are measured, and then the gas temperature, pressure, and vapour concentration are measured. The numerical simulation is used to investigate the effect of the integral absorbance and collisional width on harmonic signals, and experiments are conducted in a sample cell. The results show that the sensitivity of the harmonic signal spectrum to integral absorbance is nearly 1. However, the sensitivity of the harmonic signal spectrum to collisional width firstly increases and then keeps invariant approximately with the increase of collisional width. The fitting method has a high measurement accuracy. Compared with predicted values, the maximum measurement errors of measured temperature, pressure, and vapour mole fraction are less than 4%, 6%, and 5.5%, respectively.

**Key words** spectroscopy; gas parameter measurement; spectroscopy fitting; wavelength modulation spectroscopy; integral absorbance; combustion flow

**OCIS codes** 300.1030; 120.6780; 300.6260; 300.6360

## 1 引 言

煤炭、石油等化石燃料的燃烧是产生能量的主要方式,尤其在航空航天领域,燃烧是飞行器的主要动力源泉,因此研究燃烧学对于能源利用和环境保护的意义极其重大。为了实现更高效的燃烧,需要应用燃烧诊断技术对燃烧系统工作进程中的各种信息进行深入研究和分析,不断完善和优化燃烧系统。压力传感器、热电偶等传统的侵入式测量手段已经无法适应先进燃烧系统对燃烧场测试的要求。随着激光技术的发展,各种非侵入式测量方法逐渐受到重视。可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术因具有响应快速、可适应恶

**收稿日期:** 2017-06-19; **收到修改稿日期:** 2017-07-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(61505263)

**作者简介:** 屈东胜(1989—),男,博士研究生,主要从事流场诊断技术方面的研究。E-mail: hnqudongsheng@126.com

**导师简介:** 洪延姬(1963—),女,研究员,博士生导师,主要从事先进推进技术方面的研究。

E-mail: hongyanji@vip.sina.com(通信联系人)

劣环境等优点而逐渐受到青睐<sup>[1]</sup>。波长调制光谱(WMS)技术是一种典型的 TDLAS 技术,该技术能够显著减小激光噪声和环境噪声的影响,提高信噪比,而且对高温、高速及强振动的燃烧场具有较强的适应性,在燃烧场诊断等领域获得了广泛应用<sup>[2-3]</sup>。

Arndt<sup>[4]</sup>通过数值仿真获得了谐波信号,这被认为是调制光谱方法研究的开端。Philippe 等<sup>[5]</sup>通过在二极管激光器的注入电流中加入正弦调制实现了波长调制光谱,这种方法被称为典型的 WMS 技术。Li 等<sup>[6]</sup>和 Rieker 等<sup>[7]</sup>发展和完善了免标定 WMS 技术,该技术利用归一化二次谐波信号消除了激光强度和探测器增益等因素的影响,通过建立仿真模型实现了气体温度和吸收分子浓度的免标定测量。随着免标定 WMS 技术的不断成熟,研究者利用 WMS 方法实现了激波管<sup>[8]</sup>以及发动机地面测试设备<sup>[9]</sup>、火力电厂设备<sup>[10]</sup>的流场研究。

为了实现气体温度、压强和水蒸气浓度的免标定测量,本文基于 WMS 理论,提出了一种利用光谱拟合实现气体参数免标定测量的方法,并进行了实验研究。

## 2 WMS 理论

激光器的注入电流受到调制后,会导致激光强度和激光频率同时发生调制。激光频率  $\nu(t)$  的表达式为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi f_m t), \quad (1)$$

式中  $t$  为时间,  $\bar{\nu}$  为加入调制后的激光中心频率,  $a$  和  $f_m$  分别为正弦调制的幅值(也称为调制深度)和频率。激光强度  $I_0(t)$  的表达式为

$$I_0(t) = \bar{I}_0 [1 + i_1 \cos(2\pi f_m t + \phi_1) + i_2 \cos(2\pi f_m t + \phi_2)], \quad (2)$$

式中  $\bar{I}_0$  为激光强度的平均值,  $i_1$  和  $i_2$  分别为线性和非线性调制幅度,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为线性和非线性频率调制与强度调制的相位差。激光频率  $\nu(t)$  和激光强度  $I_0(t)$  可在选定吸收谱线后通过实验测量获得<sup>[11]</sup>。

由 Beer-Lambert 定律可知,谱线穿过流场后的透射强度  $I_1(t)$  可表示为

$$I_1(t) = I_0(t) \exp(-\alpha_j) = I_0(t) \exp(-A_j \phi_j), \quad (3)$$

式中  $\alpha_j$  为谱线  $j$  的吸光度;  $\phi_j$  为谱线  $j$  的线型函数;  $A_j$  为谱线  $j$  的积分吸光度,其表达式为

$$A_j \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_j[\nu(t)] \phi_j d\nu \equiv \int_0^L p(x) X(x) S_j[T(x)] dx, \quad (4)$$

式中  $p$  为气体压强,  $X$  为吸收分子的物质的量分数,  $S_j(T)$  为谱线  $j$  的线强度,  $L$  为吸收光程,  $T$  为温度。如果流场为均匀流场,则  $A_j = p X S_j(T) L$ 。

$\phi_j$  常选用 Voigt 线型函数,该函数由多普勒线宽  $\Delta\nu_D$  和碰撞线宽  $\Delta\nu_c$  决定。  $\phi_j$  和  $\Delta\nu_D$  的表达式分别为

$$\phi_j(\nu) = \frac{\sqrt{\ln 2}}{\pi^{3/2}} \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_D} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp[-\ln 2 \cdot (t - \nu_0)^2 / \Delta\nu_D^2]}{\Delta\nu_c^2 + (\nu - t)^2} dt, \quad (5)$$

$$\Delta\nu_D = 3.581 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (6)$$

式中  $\nu_0$  为谱线频率,  $M$  为吸收分子的摩尔质量。

不同分子间的碰撞展宽效应产生的洛伦兹线宽之和  $\Delta\nu_c$  为

$$\Delta\nu_c = p \sum_i [X_i \cdot \gamma_i(T_0) \cdot (T_0/T)^{n_i}], \quad (7)$$

式中  $\gamma_i(T_0)$  为谱线  $i$  的展宽系数;  $T_0$  为参考温度,常取为 296 K;  $n_i$  为谱线  $i$  的展宽系数相应的温度指数;  $X_i$  为水蒸气的物质的量分数。在测量燃烧气体时,通常只考虑吸收分子的自碰撞及其与空气的碰撞,则(7)式可简化为

$$\Delta\nu_c = p \cdot X_j \cdot \gamma_j(T_0) \cdot (T_0/T)^{n_j} + p \cdot (1 - X_j) \cdot \gamma_{\text{air}}(T_0) \cdot (T_0/T)^{n_{\text{air}}}, \quad (8)$$

式中  $\gamma_j(T_0)$  和  $\gamma_{\text{air}}(T_0)$  分别为谱线  $j$  的自展宽系数和空气展宽系数,  $n_j$  和  $n_{\text{air}}$  分别为相应的温度指数和空气温度指数。  $S(T_0)$  为谱线线强度,  $\gamma_{\text{self}}(T_0)$  为自展宽系数,  $\gamma_{\text{air}}(T_0)$  为空气展宽系数,  $n_{\text{self}}$  为自展宽系数温度指数,  $n_{\text{air}}$  为空气展宽系数温度指数。这些光谱参数可通过实验测量获得<sup>[12]</sup>。

透射强度  $I_1(t)$  乘以参考信号并锁相滤波后可获得谱线  $j$  谐波信号的 X 分量  $X_{nf}^2$  和 Y 分量  $Y_{nf}^2$ , 进而获

得谐波信号的幅值  $R_{nf}$ , 其表达式为

$$R_{nf} = \sqrt{X_{nf}^2 + Y_{nf}^2} \quad (9)$$

谐波信号  $R_{nf}$  包含了相同的激光强度  $I_0(t)$ 、激光器噪音、探测器增益等因素, 但是对积分吸光度  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  的响应不同, 采用一次谐波信号归一化能够消除共同因素的影响, WMS- $2f/1f$  (记为  $R_{2f/1f}$ ) 信号的表达式为

$$R_{2f/1f} = \sqrt{X_{2f}^2 + Y_{2f}^2} / \sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2} = f(A, \Delta v_c, \Delta v_D) \quad (10)$$

### 3 基于光谱拟合的测量方法

#### 3.1 测量方法

谐波信号  $R_{2f/1f}$  是关于  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  的函数, 以  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  为自由变量建立 WMS 模型, 通过最小二乘法拟合实验测得的  $R_{2f/1f}$  可获得谱线的  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  等参数, 进而实现气体参数的测量。采用 2 条谱线进行测量, 基于最小二乘法的谐波信号拟合流程如图 1 所示, 图中的  $\epsilon$  为数值很小的数。由图 1 可知, 通过对比实验与仿真的  $R_{2f/1f}$  信号, 寻找最优的自由变量, 即可获得谱线的  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  等参数。

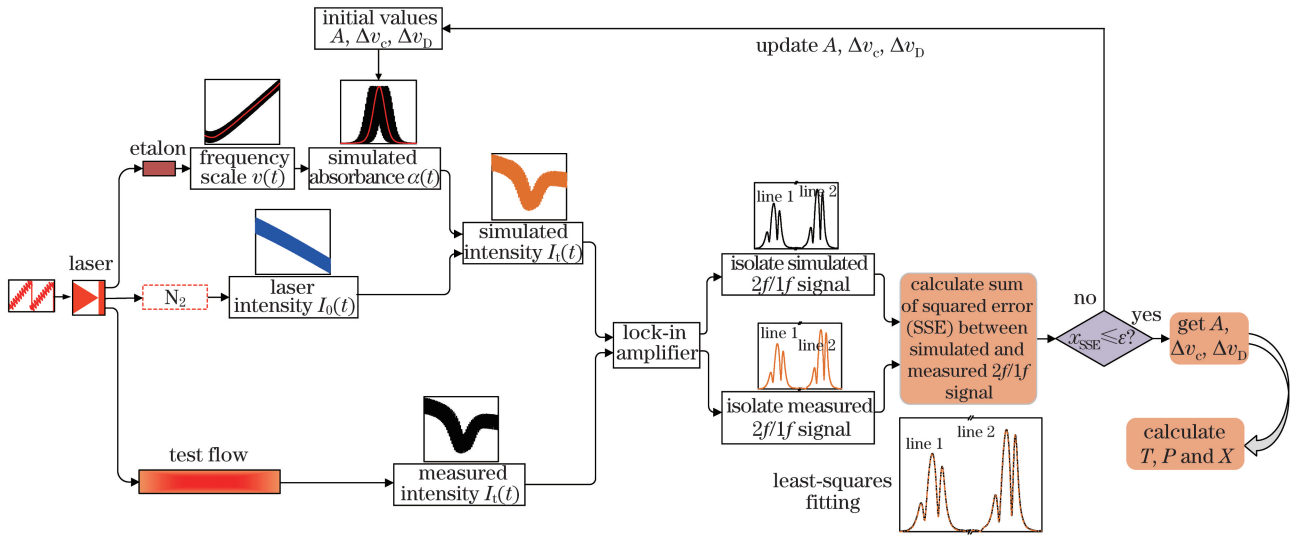


图 1 基于 WMS 的谐波信号拟合流程示意图

Fig. 1 Fitting flow chart for harmonic signal based on WMS

为了实现谐波信号的最优拟合, 以实验与仿真的  $R_{2f/1f}$  信号的误差平方和 (SSE) 为目标函数, 其表达式为

$$x_{SSE} = \sum_N [R_{2f/1f}^m(i) - R_{2f/1f}^s(i)], \quad (11)$$

式中  $R_{2f/1f}^m$  为实验测得的  $R_{2f/1f}$  信号,  $R_{2f/1f}^s$  为仿真的  $R_{2f/1f}$  信号,  $N$  为  $R_{2f/1f}$  信号的数据点。  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  等参数的更新方法如下: 1) 预估被测流场, 给定 2 条谱线的初始  $A$  和初始  $\Delta v_D$ , 在  $\Delta v_c$  的变化范围内分别计算 2 条谱线的  $x_{SSE}$ , 当  $x_{SSE}$  最小时, 获得 2 条谱线的  $\Delta v_c$ ; 2) 固定 2 条谱线的  $\Delta v_c$ , 在  $A$  的变化范围内计算 2 条谱线的  $x_{SSE}$ , 当  $x_{SSE}$  最小时获得 2 条谱线的积分吸光度  $A_1$  和  $A_2$ ; 3) 利用 2 条谱线的积分吸光度  $A_1$  和  $A_2$  更新 2 条谱线的  $\Delta v_D$ , 更新公式为

$$\Delta v_D = 7.18 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{M |E_2'' - E_1''| hc/k}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{|E_2'' - E_1''|}{T_0}}}, \quad (12)$$

式中  $S(T_0)$  和  $E''$  分别为谱线的线强度和低跃迁态能级,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $k$  为玻尔兹曼常数, 下标 1 和 2 分别表示谱线 1 和谱线 2。

2 条谱线的谐波信号拟合结束后, 利用 2 条谱线的  $A$ 、 $\Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  计算被测流场内的气体温度、压强和水蒸气的物质的量分数, 计算公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \frac{|E''_2 - E''_1| hc/k}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{|E''_2 - E''_1|}{T_0}} \\ p_j = \frac{A_1}{S_1(T)L} \\ p = \frac{\Delta v_c + p_j \cdot \gamma_{\text{air}}(T_0) \cdot (T_0/T)^{n_{\text{air}}} - p_j \cdot \gamma_j(T_0) \cdot (T_0/T)^{n_j}}{p_j \cdot \gamma_{\text{air}}(T_0) \cdot (T_0/T)^{n_{\text{air}}}} \\ X_j = \frac{p_j}{p} \end{array} \right. , \quad (13)$$

式中  $p_j$  为吸收分子的分压。

### 3.2 积分吸光度对谐波信号的影响

由 WMS 理论可知,  $R_{2f/1f}$  是关于积分吸光度  $A$ 、多普勒线宽  $\Delta v_D$  和碰撞线宽  $\Delta v_c$  的函数。为了讨论  $R_{2f/1f}$  线型对这些参数的灵敏性, 首先定义  $R_{2f/1f}$  光谱线型对参数  $\lambda$  的灵敏度  $\delta_\lambda$  为

$$\delta_\lambda = \frac{x_{\text{SSD}}^n}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2 / \bar{\lambda}^2}, \quad (14)$$

式中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\bar{\lambda}$  分别为参数  $\lambda$  的初始值、最终值和平均值,  $x_{\text{SSD}}^n$  为不同光谱线型 ( $R_{2f/1f}$  信号) 归一化平方差之和 (SSD), 其表达式为

$$x_{\text{SSD}}^n = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{2,i} - S_{1,i})^2}{\sum_{i=1}^N \bar{S}_i^2}, \quad (15)$$

式中  $S_{1,i}$ 、 $S_{2,i}$  和  $\bar{S}$  分别为与参数  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\bar{\lambda}$  对应的激光频率  $\nu(t)$  附近  $R_{2f/1f}$  信号的光谱线型。

在谱线频率为  $7185.60 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta v_D$  为  $0.041 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta v_c$  为  $0.060 \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_{1'}$  [为了与(12)式中的  $A_1$  区分] 为  $0.005 \text{ cm}^{-1}$ ,  $N$  为 4000 的条件下, 仿真  $2f/1f$  信号光谱对积分吸光度  $A$  的灵敏度  $\delta_A$  随  $A$  的变化如图 2 所示。由图 2 可知, 灵敏度  $\delta_A$  约为 1。

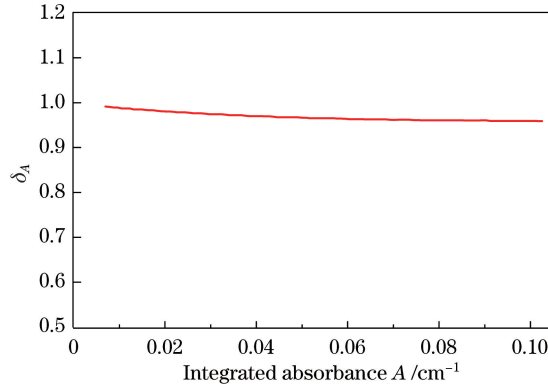


图 2  $2f/1f$  光谱对积分吸光度  $A$  的灵敏度  $\delta_A$  随  $A$  的变化

Fig. 2 Variation of sensitivity  $\delta_A$  of  $2f/1f$  spectra to integrated absorbance  $A$  with  $A$

### 3.3 碰撞线宽对谐波信号的影响

多普勒线宽  $\Delta v_D$  是关于温度的函数, 且只与温度相关, 因此主要讨论碰撞线宽  $\Delta v_c$  对  $2f/1f$  光谱的影响。在谱线频率为  $7185.60 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta v_D$  为  $0.041 \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_{1'}$  为  $0.005 \text{ cm}^{-1}$  的条件下, 归一化  $2f/1f$  光谱随  $\Delta v_c$  的变化如图 3 所示。由图 3 可知, 随着  $\Delta v_c$  增大,  $2f/1f$  光谱逐渐增大, 但是  $\Delta v_c$  对  $2f/1f$  光谱两侧 (即侧翼) 的影响更大。

在谱线频率为  $7185.60 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\Delta v_D$  为  $0.041 \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_{1'}$  为  $0.005 \text{ cm}^{-1}$ ,  $N$  为 4000 的条件下,  $2f/1f$  信号仿真光谱对  $\Delta v_c$  的灵敏度  $\delta_{\Delta v_c}$  随  $\Delta v_c$  的变化如图 4 所示。由图 4 可知, 当  $\Delta v_c$  小于  $0.3 \text{ cm}^{-1}$  时, 随着  $\Delta v_c$  不断增大,  $\delta_{\Delta v_c}$  逐渐增大, 当  $\Delta v_c$  大于  $0.3 \text{ cm}^{-1}$  时, 随着  $\Delta v_c$  不断增大,  $\delta_{\Delta v_c}$  近似保持为 1。

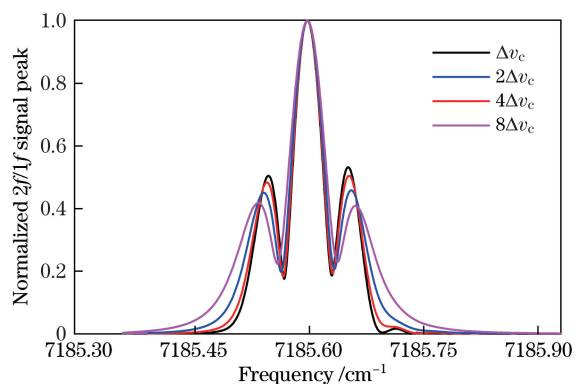


图 3 仿真的归一化  $2f/1f$  光谱随碰撞线宽  $\Delta v_c$  的变化  
Fig. 3 Variations of simulated normalized  $2f/1f$  spectra with collisional width  $\Delta v_c$ .

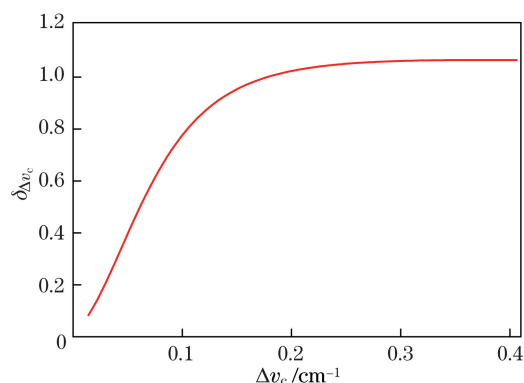


图 4  $2f/1f$  光谱对碰撞线宽  $\Delta v_c$  的灵敏度  $\delta_{\Delta v_c}$  随  $\Delta v_c$  的变化  
Fig. 4 Variation of sensitivity  $\delta_{\Delta v_c}$  of  $2f/1f$  spectrum to collisional width  $\Delta v_c$  with  $\Delta v_c$ .

## 4 实 验

采用光谱拟合方法在温度、压强和水蒸气浓度可控的样品池中进行实验,实验装置示意图如图 5 所示。实验装置主要有激光器(NLK1B5EAAA 型)、激光二极管控制器(LDC-3900 型)、标准具(SA200 型)、光电探测器(IGA-030 型)、数据采集卡(PCI-6115 型)、光纤合束/分束器(WDM-12N-111-1340/1390-7/125-PPP-50 型)以及样品池等。

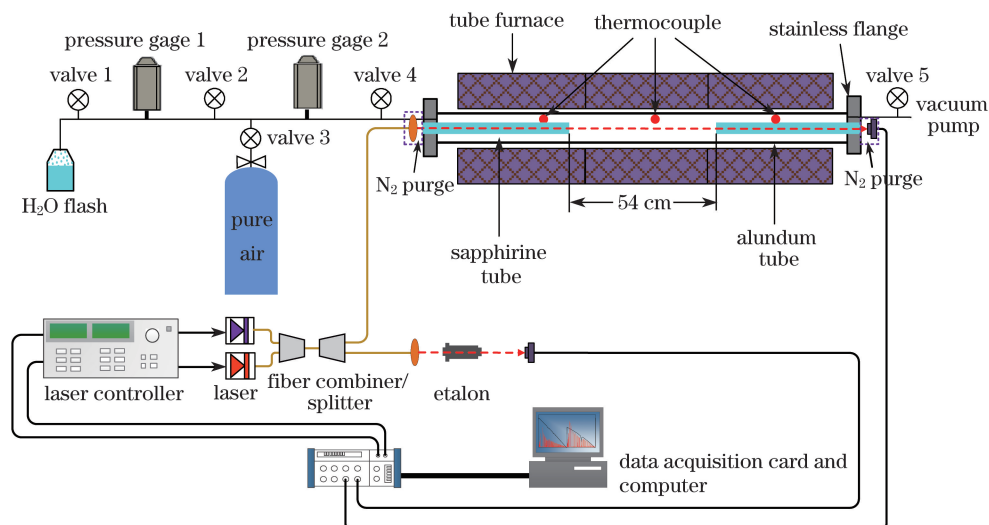


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Diagram of experimental setup

激光器控制器用以控制激光器的电流和温度,使激光器输出波长在所选波长附近。激光经合束/分束器后,分别穿过样品池和标准具,再由探测器探测,然后由数据采集卡采集并保存。标准具用于校准频率,标准具信号可用于激光频率  $\nu(t)$  的测量。样品池中充有水蒸气与空气的混合气体,位于高温管式炉的炉膛内,两端由不锈钢水冷法兰密封,法兰上安装有石英窗口。样品池两端放置 2 个长度均为 35 cm 的蓝宝石棒,蓝宝石棒之间的区域为恒温吸收区,长度为 54 cm。3 个热电偶(Omega 公司,精度为  $\pm 0.75\%$ ) 均匀分布在 3 个加热器内部,用于监测炉膛温度。管炉装置还包含完整的配气与抽真空设备,外部配气管路安装有 2 个真空压力计(Inficon 公司,精度为  $\pm 0.15\%$ ),不锈钢瓶内存储蒸馏水。吸收区内的气体温度可通过管炉的加热器进行调节,通过热电偶进行监控;气体压强通过真空泵进行调节,通过压力计进行监控。吸收区内水蒸气的物质的量分数可通过调节充入吸收区内纯净水蒸气和纯净空气的压强进行配制,配制过程如下:先对吸收区抽真空,水蒸气扩散到吸收区内,压力计记录纯净水蒸气的压强  $p_1$ ;然后在吸收区内充入不含水蒸气的

纯净空气,压力计记录混合气体的压强  $p_2$ ;水蒸气的物质的量分数  $X = p_1/p_2$ 。

文献[13]给出了水蒸气的选择原则,可归纳和总结如下:1)谱线具有合适的线强度;2)选择低跃迁态能级  $E''$ 合适的谱线;3)选择低跃迁态能级  $E''$ 间隔较大的谱线组合。按照上述原则,选取水蒸气频率分别为  $7185.60, 7454.45 \text{ cm}^{-1}$  的 2 条吸收谱线进行测量,采用时分复用方法控制 2 个激光器交替扫描,即一个激光器工作时另一个激光器处于关闭状态,调制频率均为  $240 \text{ kHz}$ ,调制深度分别为  $0.056, 0.079 \text{ cm}^{-1}$ 。激光穿过样品池后由探测器进行探测,在压强为  $101.325 \text{ kPa}$ 、温度为  $1000 \text{ K}$ 、水蒸气物质的量分数为  $6.53\%$  的条件下,探测器信号如图 6 所示。由图 6 可知,2 条谱线都产生了明显的吸收,其中频率为  $7185.60 \text{ cm}^{-1}$  的谱线的吸收明显大于频率为  $7454.45 \text{ cm}^{-1}$  的谱线的吸收。

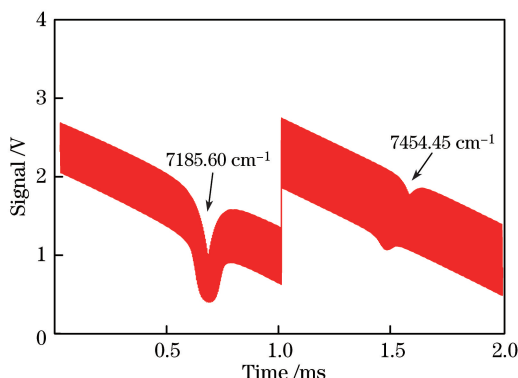


图 6 压强为  $101.325 \text{ kPa}$ 、温度为  $1000 \text{ K}$ 、水蒸气物质的量分数为  $6.53\%$  条件下的探测器信号  
Fig. 6 Detected signal under the conditions of pressure of  $101.325 \text{ kPa}$ , temperature of  $1000 \text{ K}$ , and vapour mole fraction of  $6.53\%$

利用数字锁相放大器解调探测器信号可分别获得 2 条谱线的  $2f/1f$  信号,进而利用图 1 中的拟合流程进行拟合。在拟合过程中,2 条谱线的  $A, \Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  的更新过程如图 7 所示。由图 7 可知,在  $2f/1f$  信号光谱拟合过程中,以  $A, \Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  作为自由变量,更新迭代 20 次后,2 条谱线的  $A, \Delta v_D$  和  $\Delta v_c$  收敛。

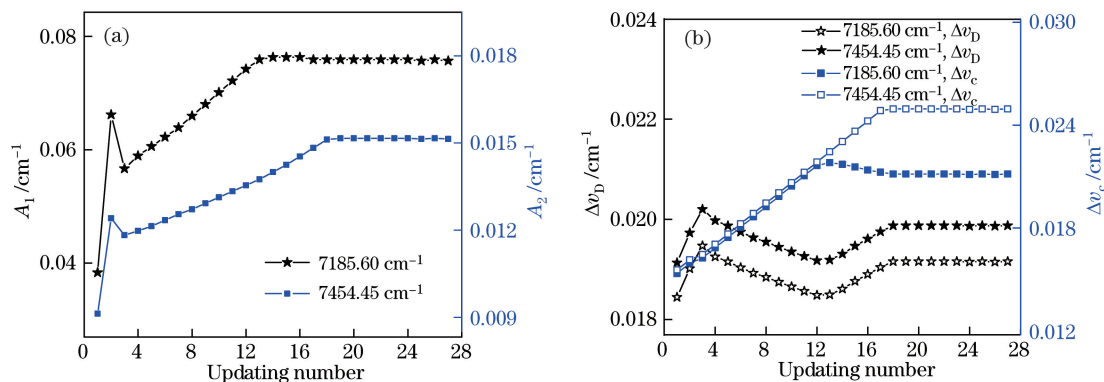


图 7 2 条谱线(a) $A$  和(b) $\Delta v_D, \Delta v_c$  的更新迭代过程  
Fig. 7 Updating processes of (a)  $A$  and (b)  $\Delta v_D$  or  $\Delta v_c$  of two spectral lines

拟合结束后,2 条谱线的仿真与实验  $R_{2f/1f}$  信号如图 8 所示。由图 8 可知,拟合结束后,仿真和实验得到的 2 条谱线  $2f/1f$  信号的残差较小,可同时获得 2 条谱线的积分吸光度  $A$ 、多普勒线宽  $\Delta v_D$  和洛伦兹线宽  $\Delta v_c$ 。利用(13)式计算得到流场内气体温度、压强和水蒸气物质的量分数分别为  $966 \text{ K}$ 、 $96.8667 \text{ kPa}$  和  $6.85\%$ ,它们与预测值的偏差分别为  $3.4\%$ 、 $4.4\%$  和  $4.9\%$ 。

为了进一步研究该方法在不同流场环境中的测量精确度,在  $500 \sim 1400 \text{ K}$  的范围内改变流场温度,每隔  $100 \text{ K}$  为一个温度点;压强变化范围为  $20.265 \sim 121.590 \text{ kPa}$ ,每隔  $20.265 \text{ kPa}$  为一个压强点。在每次进行实验测量前,重新对吸收区内的气体组分进行配制,以保证水蒸气的物质的量分数为  $6.53\%$ 。压强为  $101.325 \text{ kPa}$  时,温度和水蒸气物质的量分数的测量值如图 9(a) 所示;温度为  $1000 \text{ K}$  时,压强和水蒸气物质

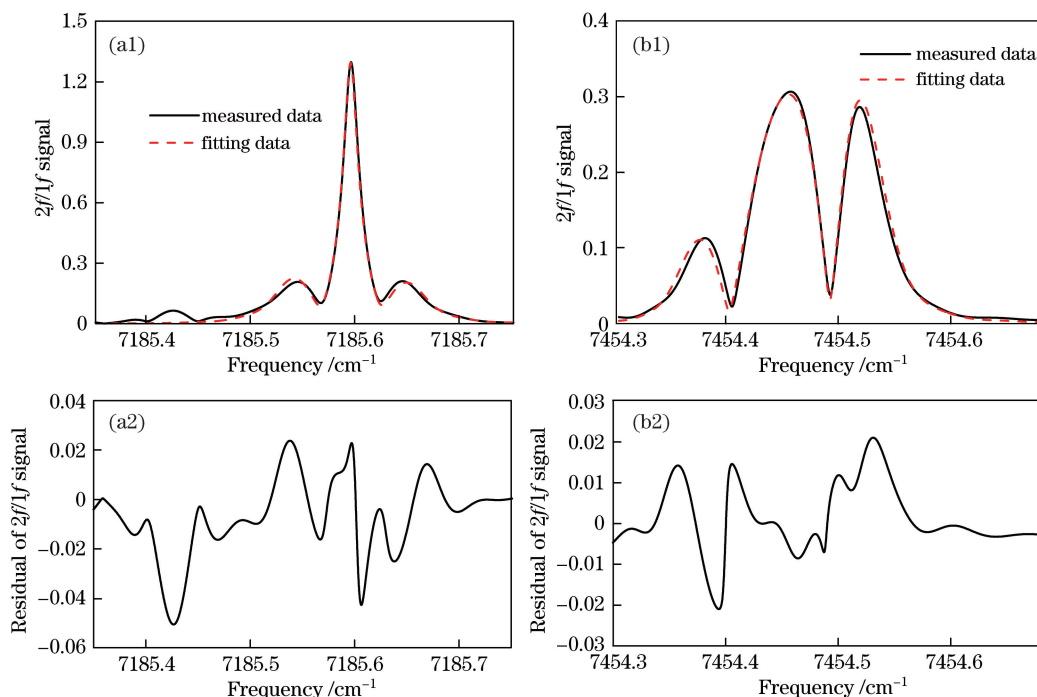


图 8 拟合结束后 2 条谱线仿真与实验  $R_{2f/1f}$  信号的对比。(a) 谱线 1; (b) 谱线 2

Fig. 8 Comparison of simulated and experimental  $2f/1f$  signals of two spectral lines after fitting.

(a) Spectral line 1; (b) spectral line 2

的量分数的测量值如图 9(b) 所示。由图 9 可知: 在  $500 \sim 1400$  K 的温度变化范围内, 温度测量值的最大偏差小于 4%; 在  $20.265 \sim 121.590$  kPa 的压强变化范围内, 压强测量值的最大偏差小于 6%, 水蒸气物质的量分数测量值的最大偏差小于 5.5%。

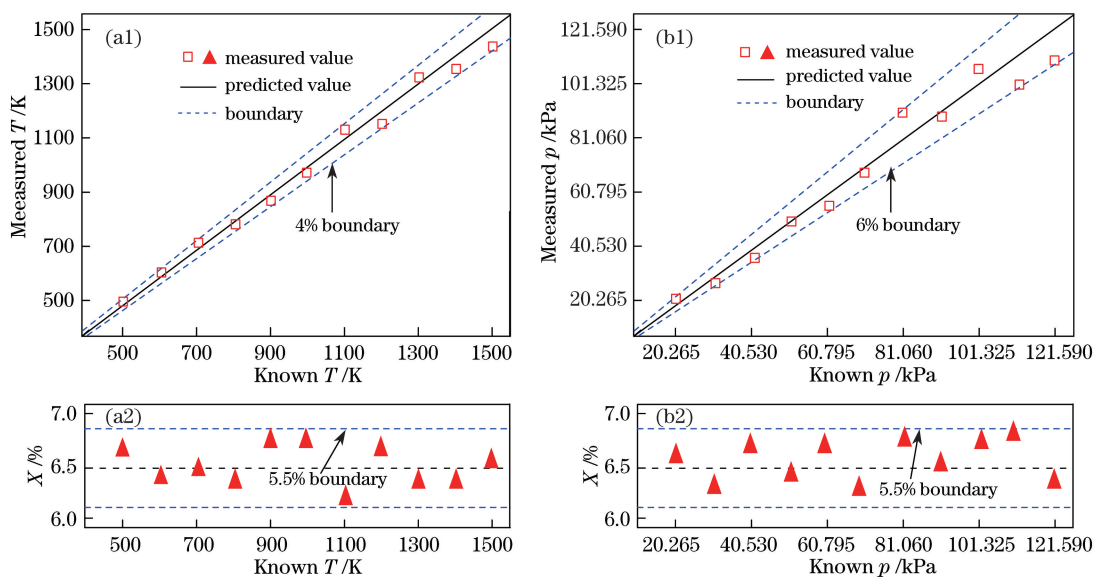


图 9 (a) 压强为 101.325 kPa 时温度和水蒸气物质的量分数的测量值;

(b) 温度为 1000 K 时压强和水蒸气物质的量分数的测量值

Fig. 9 (a) Measured temperature and vapour mole fraction at pressure of 101.325 kPa;

(b) measured pressure and vapour mole fraction at temperature of 1000 K

由实验结果可知, 基于光谱拟合法能够实现燃烧场中气体温度、压强以及水蒸气物质的量分数等参数的测量, 并且具有较高的测量精度。误差的主要来源是利用(13)式计算气体参数时所用的谱线光谱参数具有

一定的误差,尤其是在计算气体压强时,需要用到 2 条谱线的 4 个参数值,即  $\gamma_{\text{self}}(T_0)$ 、 $\gamma_{\text{air}}(T_0)$ 、 $n_{\text{self}}$  和  $n_{\text{air}}$ , 它们的值如表 1 所示。

表 1 频率分别为  $7185.60 \text{ cm}^{-1}$  和  $7454.45 \text{ cm}^{-1}$  的谱线的部分光谱参数

Table 1 Partial spectrum parameters of spectral lines with frequencies of  $7185.60 \text{ cm}^{-1}$  and  $7454.45 \text{ cm}^{-1}$

Frequency $\nu_0 / \text{cm}^{-1}$	Air-broadened coefficient $\gamma_{\text{air}} / (\text{cm}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$	$n_{\text{air}}$	Self-broadened coefficient $\gamma_{\text{self}} / (\text{cm}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$	$n_{\text{self}}$
7185.60	0.00040460	0.65	0.0020232	0.59
7454.45	0.00031878	0.37	0.0019541	0.56

## 5 结 论

基于 WMS 理论,研究了一种通过光谱拟合实现燃烧场内气体参数测量的方法。在燃烧场中进行测量时,基于光谱拟合法能够实现所选谱线积分吸光度、多普勒线宽和碰撞线宽等参数的测量,而这些参数与气体温度、压强和吸收分子物质的量分数密切相关,可用于测量流场中气体温度、压强和吸收分子的物质的量分数。基于数值仿真研究了  $2f/1f$  光谱线型随积分吸光度和碰撞线宽的变化规律, $2f/1f$  光谱线型对积分吸光度的灵敏度约为 1,对碰撞线宽的灵敏度则随碰撞线宽的不断增大而先增大后基本不变。

## 参 考 文 献

- [1] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, *et al.* Infrared laser-absorption sensing for combustion gases[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 60: 132-176.
- [2] Yang Bin, He Guoqiang, Liu Peijin, *et al.* TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0508006.  
杨斌, 何国强, 刘佩进, 等. 利用 TDLAS 技术开展吸气式发动机来流热试实验参数测量[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508006.
- [3] Hanson R K. Applications of quantitative laser sensors to kinetics, propulsion and practical energy systems[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1-40.
- [4] Arndt R. Analytical line shapes for Lorentzian signals broadened by modulation[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(8): 2522-2524.
- [5] Philippe L C, Hanson R K. Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 6090-6103.
- [6] Li H J, Rieker G B, Liu X, *et al.* Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases[J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 1052-1061.
- [7] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[J]. Applied Optics, 2009, 48(29): 5546-5560.
- [8] Li S J, Davidson D F, Hanson R K, *et al.* Shock tube measurements and model development for morpholine pyrolysis and oxidation at high pressures[J]. Combustion and Flame, 2013, 106(9): 1559-1571.
- [9] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, *et al.* Infrared laser absorption sensors for multiple performance parameters in a detonation combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 3739-3747.
- [10] Chao X, Jeffries J B, Hanson R K. Real-time, *in situ*, continuous monitoring of CO in a pulverized-coal-fired power plant with a  $2.3 \mu\text{m}$  laser absorption sensor[J]. Applied Physics B, 2013, 110(3): 359-365.
- [11] Sun K, Chao X, Sur R, *et al.* Wavelength modulation diode laser absorption spectroscopy for high-pressure gas sensing[J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 497-508.
- [12] Goldenstein C S, Hanson R K. Diode-laser measurements of linewidth and temperature-dependent lineshape parameters for  $\text{H}_2\text{O}$  transitions near  $1.4 \mu\text{m}$  using Voigt, Rautian, Galatry, and speed-dependent Voigt profiles[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2015, 152: 127-139.
- [13] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K, *et al.* Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser[J]. Applied Physics B, 2005, 81(5): 711-722.