

基于波长调制光谱的多参数测量方法研究

屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 王明东, 潘虎

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 基于扫描波长调制光谱技术, 开发了一种同时测量气体压强、温度和组分浓度等多个参数的传感器. 详细分析了利用谱线的 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$ 和 $2f/1f$ 信号测量气体参数的迭代算法以及传感器的设计方案. 采用频分复用方案, 利用 $7\,429.72\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,454.45\text{ cm}^{-1}$ 两条 H_2O 谱线对温度分布在 $300\sim 1\,200\text{ K}$ 范围内的静态气室进行了实验研究. 实验结果表明, 迭代算法具有收敛速度快和测量精度高等优点, 温度、压强和 H_2O 组分浓度的测量值与预测值基本符合, 与预测值的最大相对偏差分别在 4%、6% 和 6% 以内.

关键词: 波长调制光谱; 传感器; 迭代算法; 气体参数

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A

Measurement of multi-parameters of gas based on the wavelength modulation spectroscopy

QU Dong-Sheng, HONG Yan-Ji, WANG Guang-Yu, WANG Ming-Dong, PAN Hu
(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: A sensor was proposed to measure temperature, concentration and pressure of the atmosphere based on scanning wavelength modulation spectroscopy. The method using $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$ and $2f/1f$ signals of H_2O spectral lines was analyzed and the sensor design program was studied. Frequency division multiplexing technology is adopted to measure gas parameters of static cell in the temperature range of $300\sim 1\,200\text{ K}$ using the two H_2O spectral lines ($7\,429.72\text{ cm}^{-1}$ and $7\,454.45\text{ cm}^{-1}$). Experimental results show that the iterative algorithm has rapid convergence rate and high accuracy. The measured gas temperature, pressure and concentration of H_2O are consistent with the predicted value with the largest relative errors 4%, 6% and 6%, respectively.

Key words: wavelength modulation spectroscopy, sensor, iterative algorithm, gas parameters

PACS: 42.62.Fi, 42.15.Eq, 42.68.Ca

引言

燃烧是获取能量的主要途径, 先进的燃烧场测量手段能够快速、准确的采集燃烧场内信息变化, 进而为优化燃烧过程、提高燃烧效率以及控制污染物排放等提供重要依据. 由于具有非侵入性、高灵敏度以及对恶劣环境适应性强等明显优势, 可调谐半导体激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 技术在燃烧场诊断领域日益受到人们的青睐^[1,2]. TDLAS 技术能够实现瞬态流场中气体温度、速度以及质量流量等参数的测量, 在

燃烧场诊断等领域应用前景广阔^[3]. TDLAS 测量方法主要有直接吸收光谱 (Direct Absorption Spectroscopy, DAS) 和波长调制光谱 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS) 两种方法. DAS 方法在恶劣环境中应用时, 信噪比较低, 测量误差较大而 WMS 方法能够有效抑制环境中低频噪音的影响, 提高信噪比, 在工业环境中具有明显的优势, 日益受到人们的重视^[4].

1963 年, Wilson^[5] 等人采用数值仿真方法得到了 Gauss 和 Lorentz 线型的三次谐波信号, 开启了调制光谱方法的研究. 1981 年, Reid^[6] 等人首次通过

收稿日期: 2015-10-20, 修回日期: 2016-04-01

基金项目: 国家自然科学基金 (21403299)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (21403299)

作者简介 (Biography): 屈东胜 (1989-), 男, 河南新乡人, 博士研究生. 主要从事瞬态流场诊断方面的研究. E-mail: hnqudongsheng@126.com

Received date: 2015-10-20, revised date: 2016-04-01

实验测量到 Gauss、Lorentz 和 Voigt 线型的二次谐波信号(2f). 1993 年, Philippe^[7] 等人推导出了 1f 和 2f 信号的数学表达式. 由于谐波信号强度与入射光强相关, 传统的波长调制光谱测量时, 为了获得流场的绝对温度和组分浓度, 需要在一个已知成分的环境中进行标定, 而这在工业环境中难以实现. 因而, 免标定 (Calibration-Free) 的波长调制光谱测量成为了一个重要的研究课题, 很多研究者开展过相关研究. Henningsen^[8] 发现利用 1f 信号的峰谷比能够实现吸收分子绝对浓度的测量, 但该方法只对孤立跃迁适用. Duffin^[9,10] 提出利用奇次谐波信号实现压强和浓度绝对测量的方法, 然而该方法只在频率调制幅度较小的情况下适用. Li^[11] 和 Rieker^[12] 等人发现谐波信号中都包含激光强度和探测器增益等信息, 并且利用 1f 归一化 2f 信号可以消除这些共同信息. 通过与仿真曲线比较可以推断气体的温度和组分浓度等参数. 然而, 该方法的主要缺点是对气体压强的依赖. 气体压强需要精确的测量或计算独立获得, 而这在高温、高压及瞬态流场内难以实现.

本文开发了一种基于波长调制光谱技术同时测量流场内气体压强、温度和组分浓度的传感器. 首先介绍了波长调制光谱的基本理论; 其次研究了基于波长调制光谱的测量方法; 然后讨论了传感器的设计方案并在静态气室内进行了实验验证.

1 基本理论

1.1 波长调制光谱理论

频率为 ν 的单色光穿过均匀气体介质时, 通常用 Beer-Lambert 定律描述透射光强和入射光强的关系, 即

$$\left(\frac{I_t}{I_0}\right)_\nu = \exp(-\alpha_\nu) = \exp(-PXS(T)\phi_\nu L) \quad (1)$$

式中, ν 是光频率, α_ν 是吸光度, I_t 和 I_0 分别是透射光强和入射光强, P 是气体总压, X 是组分浓度 (摩尔分数), L 是吸收长度. $S(T)$ 是吸收谱线的线强度, 是关于温度的函数, 随温度变化的特性取决于低跃迁态能级 E'' , 表达式为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \exp\left[-\frac{hcE''}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-h\nu_0}{kT}\right)\right]^{-1} \left[1 - \exp\left(\frac{-h\nu_0}{kT_0}\right)\right]^{-1} \quad (2)$$

式中, T_0 是参考温度 (通常为 296 K), $Q(T)$ 是配分函数, 可利用多项式计算得到不同温度时刻的配分

函数值^[13]. h 是普朗克常数, c 是光速, k 是玻尔兹曼常数. 线型函数 ϕ_ν 在频率域上的积分是归一化的, 对 α_ν 在频率域上积分可提取谱线的光谱特征, 即积分吸光度 A 为

$$A = \int \alpha_\nu d\nu = \int P \cdot X \cdot S(T) \cdot \phi_\nu \cdot L d\nu = P \cdot X \cdot S(T) \cdot L \quad (3)$$

典型的 WMS 测量时, 通常在二极管激光器的注入电流加入高频调制. 加入调制后, 激光的频率和强度都会产生调制效应, 分别称为频率调制 (Frequency Modulation, FM) 和强度调制 (Intensity Modulation, IM). 加入调制的 $I_0(t)$ 和 $\nu(t)$ 的表达式分别为

$$I_0(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(2\pi ft + \psi_1) + i_2 \cos(2\pi ft + \psi_2)] \quad (4)$$

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi ft) \quad (5)$$

式中, \bar{I}_0 为平均激光强度, i_0 和 ψ_1 分别是线性调制幅度和线性 FM/IM 相移, i_2 和 ψ_2 分别是非线性调制幅度和非线性 FM/IM 相移, f 是调制频率, $\bar{\nu}$ 为平均激光频率, a 为调制深度. $I_0(t)$ 和 $\nu(t)$ 可分别通过实验测量或拟合获得, 进而可实现谐波信号的仿真, 其仿真过程如图 1 所示. 仿真过程主要为: 1) 通过实验同时测量 $I_0(t)$ 和法布里·珀罗标准具的干涉信号; 2) 利用标准具的干涉信号拟合激光频率 $\nu(t)$ ^[14]; 3) 假设流场的基本参数: 温度、 H_2O 组分浓度、压强和吸收长度, 计算光谱的基本参数: 积分吸光度 A 、Gauss 线宽、Lorentz 线宽; 4) 仿真完整的光谱线型 α_ν , 根据 Beer-Lambert 定律仿真透射光强信

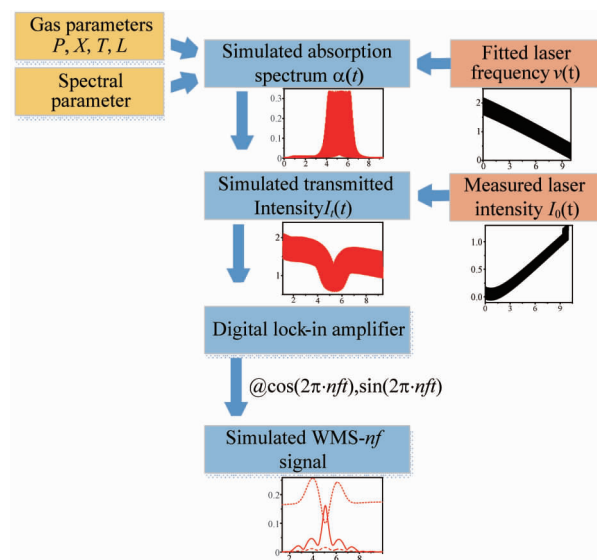


图 1 谐波信号的仿真过程

Fig. 1 Simulation process of harmonic signals

号 I_i ; 5) 采用数值锁相算法, 提取谐波信号的 X 和 Y 分量, 经过计算可得到谐波信号的幅度信息, 计算式为

$$S_{nf} = \sqrt{X_{nf}^2 + Y_{nf}^2} \quad (6)$$

通过仿真谐波信号, 可建立谐波信号与气体参数的仿真曲线, 通过迭代算法实现气体参数的测量.

1.2 气体参数测量方法

谐波信号包含气体参数等信息, 结合仿真与实验, 通过迭代算法可实现气体压强、温度和组分浓度等参数的测量. 气体压强通过一条谱线四次谐波信号 ($4f$) 幅值与二次谐波信号 ($2f$) 幅值的比值 ($4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$) 测量, 而气体温度通过两条吸收谱线的归一化二次谐波信号 ($2f/1f$ 信号) 幅值的比值测量. 获得温度和压强后, 利用一条谱线的 $2f/1f$ 信号幅值计算组分浓度, 迭代过程如图 2 所示.

其详细步骤为

1) 提取实验测量的两条谱线的 $2f/1f$ 信号以及某条谱线 (如 $7\,454.45\text{ cm}^{-1}$) 的 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$ 信号;

2) 预估被测流场, 给定初始压强 P_0 和组分浓度 X_0 ;

3) 仿真两条谱线的谐波信号, 建立两条谱线 $2f/1f$ 信号幅值的比值与温度的仿真曲线;

4) 将实验测得的两条谱线 $2f/1f$ 信号幅值的比值与建立的仿真曲线对比, 获得温度 T_i ;

5) 得到 T_i 时一条吸收谱线 (如 $7\,454.45\text{ cm}^{-1}$) 的 $2f/1f$ 信号幅值, 利用实验测得的同一条吸收谱线 $2f/1f$ 信号幅值计算组分浓度 X_i , 计算式为

$$X_{i+1} = \frac{(C_{2f/1f})_{\text{meas}} X_i}{(C_{2f/1f})_{\text{sim}}} \quad (7)$$

式中, $(C_{2f/1f})_{\text{meas}}$ 表示测量的 $2f/1f$ 信号幅值, $(C_{2f/1f})_{\text{sim}}$ 表示仿真的 $2f/1f$ 信号幅值;

6) 判断是否满足条件 ($|X_{i+1} - X_i|/X_i \leq \varepsilon$), 满

足, 迭代结束, 获得温度和组分浓度, 不满足, 更新 X_i , 重新迭代计算;

7) 上述迭代结束时, 利用得到的温度 T 和浓度 X , 建立一条谱线 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$ 信号与压强的仿真曲线;

8) 将实验测得的该条谱线 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$ 值与建立的仿真曲线对比, 获得压强 P_i ;

9) 判断是否满足条件 ($|P_{i+1} - P_i|/P_i \leq \varepsilon$), 满足, 迭代结束, 获得流场压强、温度和组分浓度, 不满足, 更新 P_i , 直至迭代结束.

2 传感器设计

2.1 吸收谱线的选择

由于 H_2O 是燃烧反应涉及的重要分子, 且是碳氢燃料的主要燃烧产物之一, 因而针对燃烧场的研究, 主要选用 H_2O 作为目标分子. H_2O 分子存在大量的吸收谱线, 选择合适的吸收谱线对 TDLAS 的测量十分关键. 基于 TDLAS 的测量需要选用两条谱线, Zhou X^[15-16] 等人详细分析了均匀流场中 H_2O 吸收谱线的选择原则, 考虑的因素主要有: 吸收强度、温度灵敏度和邻近谱线的干扰. 依据上述选择原则, 选择 $7\,429.72\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,454.45\text{ cm}^{-1}$ 两条 H_2O 谱线, 谱线的部分参数如表 1 所示.

表 1 实验采用的 H_2O 谱线

Table 1 Summary of selected H_2O line

Wavelength/nm	Frequency/ cm^{-1}	Linestrength(296 K) $/\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$	Low state energy $/\text{cm}^{-1}$
1 345.9	7 429.72	4.54×10^{-3}	982.91
1 341.5	7 454.45	1.73×10^{-4}	1 962.51

所选谱线的线强度和温度灵敏度随温度的变化如图 3 所示. 由图可知, 在 $300 \sim 1\,400\text{ K}$ 的温度范围内, 谱线的线强度变化很大, 主要是因为线强度随

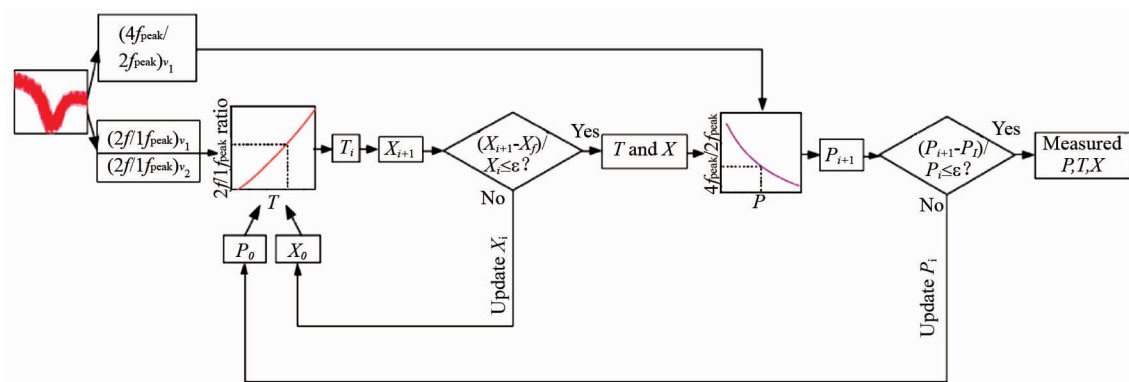


图 2 气体参数的迭代计算过程

Fig. 2 Process of iterative calculation for gas parameters

温度的变化趋势取决于谱线的低跃迁态能级 E'' , E'' 不同的谱线,其强度峰值对应的温度不同. 温度灵敏度和两条谱线的低跃迁态能级之差 $|\Delta E''|$ 密切相关, $|\Delta E''|$ 越大,灵敏度越高,所选谱线对在被测温度范围内具有较高的灵敏度.

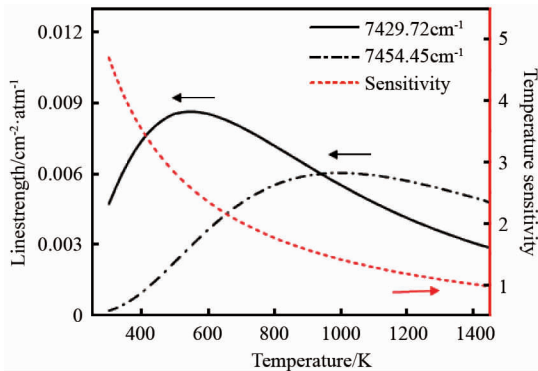


图3 谱线强度和温度灵敏度随温度的变化
Fig. 3 Line strength and temperature sensitivity as a function of temperature

2.2 调制指数的优化

基于 WMS 的测量是利用谐波信号实现的,而谐波信号的强度和调制指数密切相关,选择最优的调制指数,能够有效的提高谐波信号的信噪比. 调制指数表达式为

$$m = a/\Delta v_{\text{HWHM}} \quad (8)$$

式中, a 是调制深度, Δv_{HWHM} 是线型函数的半高半宽 (Half Width at Half Maximum, HWHM). 在实际测量过程中,通常预估被测流场的气体参数,尽可能选择最优的调制指数使得谐波信号具有最大幅值. 基于 WMS 的测量主要是利用 $2f$ 、 $4f$ 和 $2f/1f$ 信号, $2f$ 、 $4f$ 以及 $2f/1f$ 信号的归一化幅值随调制指数的变化如图 4 所示. 由图可知,调制指数 $m \approx 1$ 时, $2f/1f$ 信号幅值具有最大值, $m \approx 2.2$ 时, $2f$ 信号幅值具有最大值, $m \approx 3.8$ 时, $4f$ 信号幅值具有最大值. 在测量过程中,并不能选择最优的调制指数使得 $2f$ 、 $4f$ 以及 $2f/1f$ 信号幅值同时取得最大值,但是经实验验证, $4f$ 信号的幅值远小于 $2f$ 和 $2f/1f$ 信号,信噪比也小于 $2f$ 和 $2f/1f$ 信号. 为了使 $4f$ 信号获得较好的信噪比,选择调制指数 $3 \leq m \leq 4.5$.

3 实验研究

3.1 实验系统

实验装置示意图如图 5 所示,包括可调谐半导体激光器 (NEL)、激光器控制电源 (ILXlightwave)、 2×1 合束器、 1×4 分束器、固体标准具 (Thorlabs)、

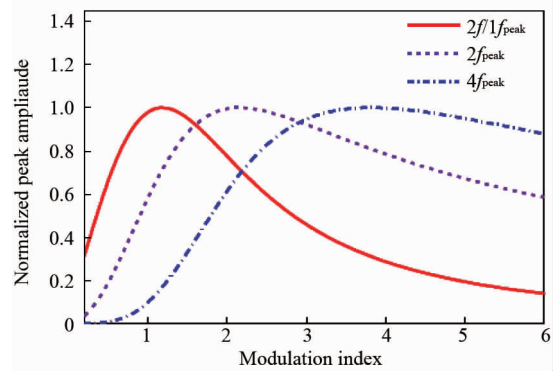


图4 $2f/1f$ 、 $2f$ 和 $4f$ 信号的归一化幅值随调制指数的变化
Fig. 4 Normalized amplitudes of $2f/1f$, $2f$ and $4f$ signal versus modulation index

探测器 (Thorlabs)、数据采集系统、样品池以及管式电炉等. 样品池设计为相互隔离的三段,由四篇楔形的石英窗口和玻璃管构成. 样品池的中间区域设计为吸收区,长 50 cm,填充适量水蒸气,用于实验测量. 两端区域设计为真空区,通过真空泵抽成真空. 吸收区内的温度和压强分别通过热电偶和压力传感器进行标定.

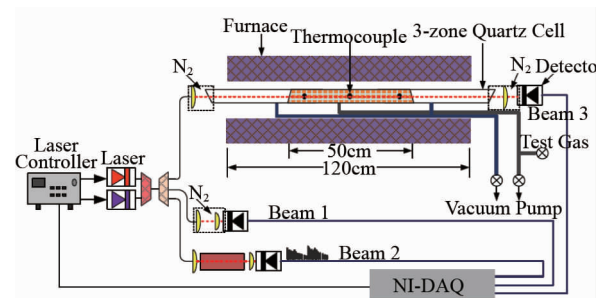


图5 实验装置示意图
Fig. 5 Schematic of experimental system

3.2 激光强度的测量和激光频率的拟合

由 WMS 理论可知,气体参数的测量依赖于仿真和实验. 确定实验中的激光参数后,需要首先测量激光强度 $I_0(t)$ 和标准具信号,其激光参数如表 2 所示.

表2 谱线 $7\,429.72\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,454.445\text{ cm}^{-1}$ 的激光参数
Table 2 Laser parameters of line $7\,429.72\text{ cm}^{-1}$ and $7\,454.445\text{ cm}^{-1}$

Frequency / cm^{-1}	Modulation voltage / V	Modulation frequency / kHz	Scanning voltage / V	Scanning frequency / kHz
7 429.72	1.2	280	1.0	1.0
7 454.45	1.0	240	1.0	1.0

每条谱线的激光强度 $I_0(t)$ 和标准具信号需要单独测量,即在表 2 中的参数条件下分别测量谱线的激光强度 $I_0(t)$ 和标准具信号. 通过激光控制器调节激光器的电流和温度,使激光频率处在所选吸收谱线附近,激光光束经过合束器和分束器. 穿过填充 N_2 的光束 1 没有被吸收,作为激光强度信号,穿过标准具信号的光束 2 用于拟合激光频率,谱线 $74\ 545.45\ \text{cm}^{-1}$ 的激光强度和标具信号的测量结果如图 6 所示.

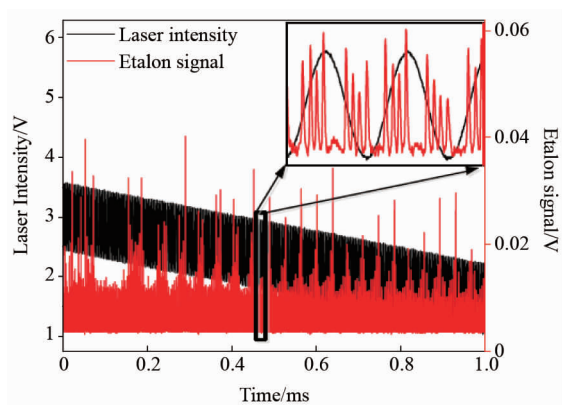


图 6 测得的谱线 $74\ 545.45\ \text{cm}^{-1}$ 的激光强度和标具信号
Fig. 6 Measured laser intensity and etalon signal of line $74\ 545.45\ \text{cm}^{-1}$

由图可知,标准具信号具有较高的信噪比,可用于拟合激光频率,标准具信号相邻峰值所对应的频率间隔为标准具的自由光谱范围 ($\text{FSR} = 0.05\ \text{cm}^{-1}$). 对 DFB 激光器而言,激光频率对注入电流的响应接近线性关系,注入电流变小时,频率变大,以图中的某一个标准具信号峰值为起始点,半个周期内,激光频率变大,另外半个周期内,激光频率减小. 频率信号和强度信号具有相同的周期,可采用多项式和正弦函数拟合激光频率随时间的变化,其拟合结果如图 7 所示.

利用测得的激光强度 $I_0(t)$ 和拟合的激光频率 $\nu(t)$,可按照图 1 的仿真过程,可仿真不同条件下的谐波信号.

3.3 数据处理过程

实验采用频分复用方式,两个激光器的输出激光经合束器和分束器后,一束光穿过样品池后,由探测器探测并将光信号转换为电信号,其探测器信号如图 8 所示(标定压强为 $1\ \text{atm}$,温度为 $800\ \text{K}$). 由图可知,激光穿过流场后产生了明显的吸收,图中的吸收是由两条谱线同时产生的.

由于采用频分复用方法,探测器信号同时包含

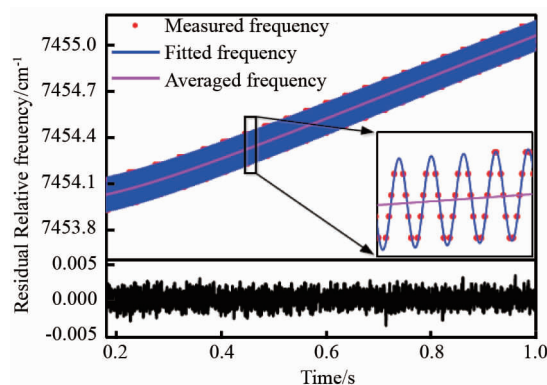


图 7 测得的谱线 $74\ 545.45\ \text{cm}^{-1}$ 的激光频率及拟合曲线
Fig. 7 Measured laser frequency and its best fit of $74\ 545.45\ \text{cm}^{-1}$

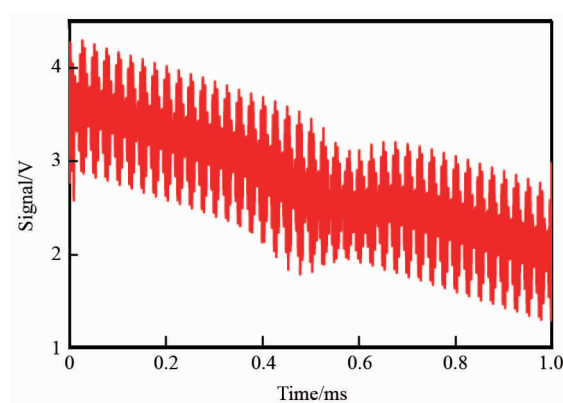


图 8 测得的探测器信号 ($P = 1\ \text{atm}$, $T = 800\ \text{K}$)
Fig. 8 Measured detector signals ($P = 1\ \text{atm}$, $T = 800\ \text{K}$)

两条谱线信息,需要将探测器信号经过数字锁相放大器处理后,才能获得每条谱线信息. 数字锁相放大器包含了混频器和低通滤波器,需要选择合适的低通滤波截止频率,才能避免不同调制频率产生的干扰. 两束激光的调制频率分别为 $280\ \text{kHz}$ 和 $240\ \text{kHz}$,当 nf_1 和 nf_2 ($n = 1 \sim 4$) 中任意两个之差都大于低通滤波截止频率时,才能通过锁相放大器将 $1f$ 、 $2f$ 和 $4f$ 信号完全分离开. 实验中低通滤波器的截止频率为 $23\ \text{kHz}$,两条谱线的 $2f$ 、 $4f$ 以及 $2f/1f$ 信号如图 9 所示.

由图可知,两条谱线的谐波信号都没有失真,且几乎看不到邻近谱线的干扰. 分别提取两条谱线的 $2f/1f$ 信号幅值、 $2f$ 信号幅值和 $4f$ 信号幅值,按照图 1 的迭代方法计算气体压强、温度和 H_2O 组分浓度,其详细迭代过程如图 10 所示. 图 10(a) 中设定压强猜想值为 $0.2\ \text{atm}$,浓度初始值为 0.2% ,温度和浓度的迭代过程如图 10(a) 所示,迭代结束后,获得温

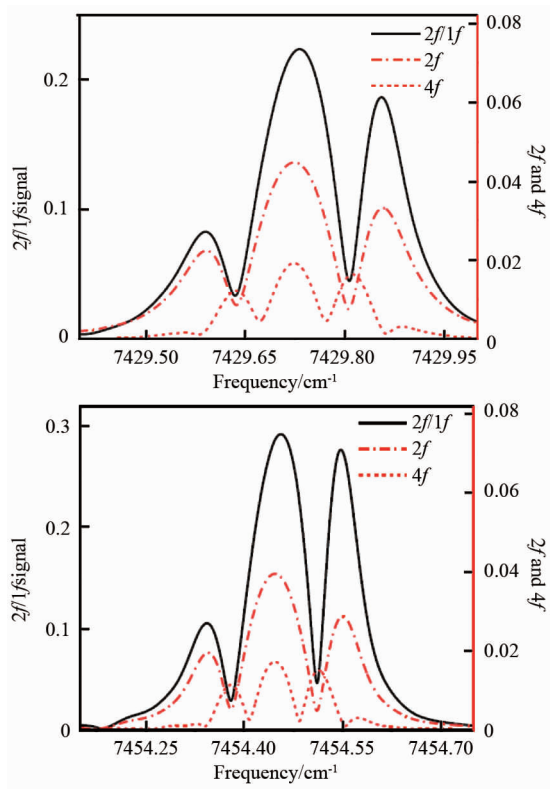


图9 测得的两条谱线的谐波信号
Fig. 9 Measured harmonic signals of two lines

度 882.52 K, 浓度 25.36%; 而后利用迭代后的温度 882.52 K 和浓度 25.36%, 建立压强与谱线(7 429.72 cm⁻¹) 的仿真曲线如图 10(b) 所示, 利用实验测得的 $4f_{\text{peak}}/2f_{\text{peak}}$ 值, 获得压强 0.782 atm; 而后利用该压强重新迭代计算温度和浓度, 迭代过程如图 10(c) 所示. 按照上述过程进行迭代, 当满足条件 $|P_{i+1}-P_i|/P_i \leq 0.001$ 时, 迭代结束, 同时获得压强、温度和组分浓度, 具体迭代过程如图 10(a~h) 所示.

由图可知, 压强经过四次迭代后, 压强、温度和组分浓度都已经收敛, 迭代结束. 分析迭代过程可知, 设定压强后, 温度和组分浓度的收敛速度较快, 且对初始浓度值不敏感. 在四次迭代过程中, 初始浓度值分别设为 0.2%、20%、15% 和 5%, 即初始浓度值偏离真实值较大, 其迭代过程仍然收敛. 通过迭代算法测得的压强、温度和组分浓度分别为 1.031 atm、810.64 K 和 8.335%, 与预测值的偏差分别小于 4%、2% 和 4%.

3.4 实验结果

样品池内温度变化范围为 300 ~ 1 200 K, 间隔 100 K 共 10 个温度点, 压强变化范围为 0.2 ~ 1.2

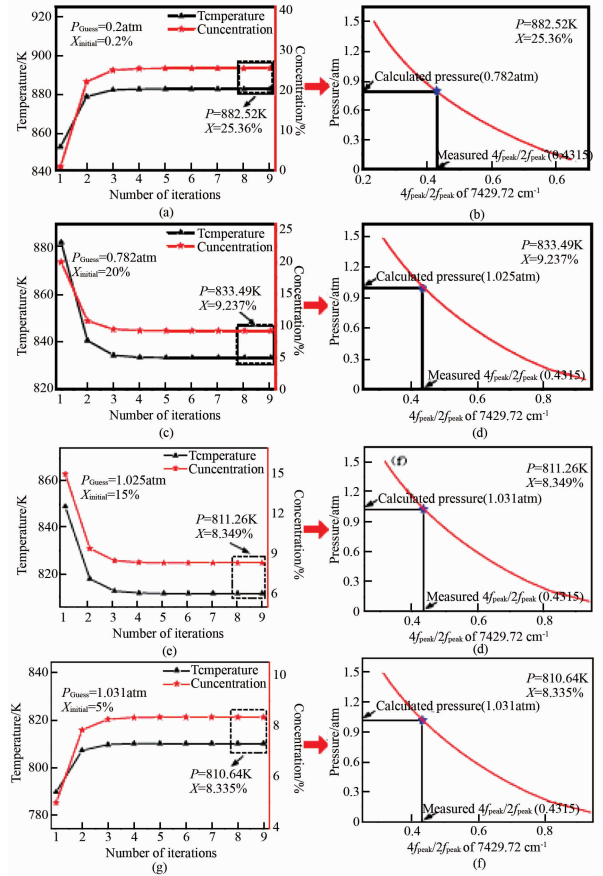


图10 计算温度、压强和组分浓度的迭代过程
Fig. 10 Iterative process for temperature, pressure and concentration

atm, 间隔 0.2 atm 共 6 个压力点, H₂O 组分浓度变化范围为 0.1% ~ 35%. 按照上述实验步骤进行测量并进行数据处理, 测量结果如图 11 所示. 图 11(a) 压强预测值为 1 atm 时, 温度、压强和 H₂O 组分浓度的测量结果, 在 300 ~ 1 200 K 的温度范围内, 温度、压强和 H₂O 组分浓度与预测值具有较好的一致性, 误差范围分别为 0.7% ~ 3.7%, 2.8% ~ 4.5% 和 2% ~ 5.5%. 图 11(b) 为温度预测值为 1 000 K 时, 在 0.2 ~ 1.2 atm 的压强范围内, 温度、压强和 H₂O 组分浓度的测量结果, 与预测值的最大相对偏差分别小于 4%、6% 和 6%.

光谱仿真是基于 WMS 方法测量的主要误差来源, 主要原因是基于 WMS 的测量依赖于仿真和实验中的谐波信号, 仿真模型的精确性以及光谱参数、调制参数等都会对实验结果造成一定程度的影响.

将上述方法应用于燃烧场诊断时具有明显的优势: 1) 基于免标定波长调制光谱方法测量, 能够同时实现气体温度、压强和吸收分子组分浓度的定量测量; 2) 测量值为光束方向上的平均值; 但该方法

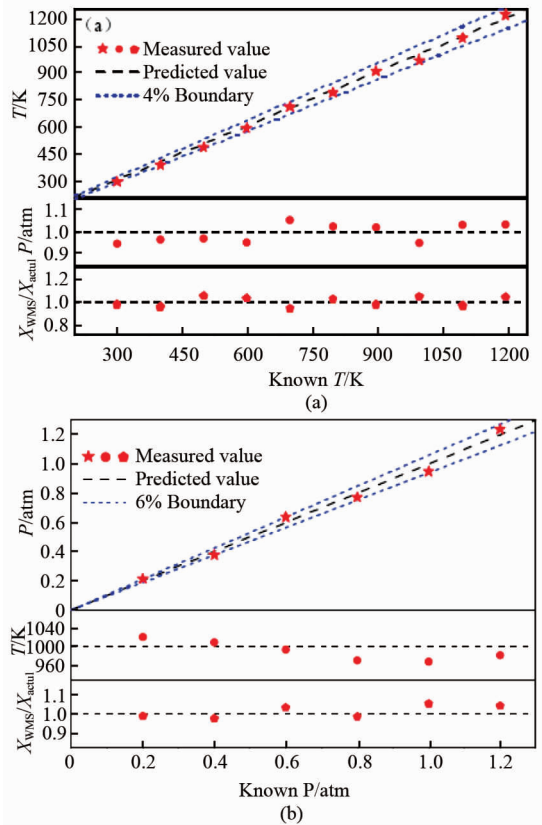


图 11 实验测量的压强、温度和组分浓度
Fig. 11 Measured pressure, temperature and concentration

在高压、强振动及强噪声等恶劣环境中的测量精确性还有待进一步验证。

4 结论

波长调制光谱技术具有抗干扰能力强、高灵敏度等特点,在发动机流场诊断等领域具有广阔的应用前景.提出了一种同时测量气体压强、温度和组分浓度的迭代算法并进行了实验验证.利用 $7\,429.72\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,454.45\text{ cm}^{-1}$ 两条 H_2O 谱线,在静态气室内进行了实验研究.实验结果表明,迭代算法具有收敛速度快、对初始值不敏感以及测量精度高等优点,在样品池内的测量值与预测值基本符合.在 $300 \sim 1200\text{ K}$ 的温度范围内,气体温度、压强和 H_2O 组分浓度和的最大偏差分别小于 4%、6% 和 6%.

References

[1] Hodgkinson J, Ralph P T. Optical gas sensing: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**: 012004-1-59.

[2] Hanson R K. Applications of quantitative laser sensors to kinetics, propulsion and practical energy system [C]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, **33**: 1-40.

[3] Sun R, Sur K, Jeffries J B, *et al.* Multi-species laser absorption sensors for in situ monitoring of syngas composition [J]. *Applied Physics B*, 2014, **115**: 9-24.

[4] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K, *et al.* Diode laser-based detection of combustor instabilities with application to a scramjet engine [C]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, **32**: 831-838.

[5] Wilson G V H. Modulation broadening of NMR and ESR line shapes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, **34**: 3276-3285.

[6] Reid J, Labrie D. Second-Harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Applied Physics B*, 1981, **26**: 203-210.

[7] 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.

[8] Henningsen J, Simonsen H. Quantitative wavelength-modulation spectroscopy without certified gas mixtures [J]. *Applied Physics B*, 2000, **70**: 627-633.

[9] Duffin K, Mcgettrick A J, Johnstone W, *et al.* Tunable diode spectroscopy with wavelength modulation: a calibration-free approach to recovery of absolute gas absorption line-shapes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(10): 3114-3125.

[10] Mcgettrick A J, Duffin K, Johnstone W, *et al.* Tunable diode laser spectroscopy with wavelength modulation: a phasor decomposition method for calibration-free measurements of gas concentration and pressure [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(4): 432-440.

[11] 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**: 1052-1060.

[12] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K, *et al.* Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29): 5546-5560.

[13] Gamache B R, Kennedy S, Hawkins R, *et al.* Total internal partition sums for molecules in the terrestrial atmosphere [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2000, **517**: 407-425.

[14] Sun K, Chao X, Sur R, *et al.* Analysis of calibration-free wavelength scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, **24**: 125203.

[15] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, **85**: 711-722.

[16] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K, *et al.* Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature [J]. *Applied Physics B*, 2006, **82**: 469-478.