

基于波长调制技术的高温高压流场温度测量方法

张步强 许振宇 刘建国 姚路 阮俊 胡佳屹 夏晖晖 聂伟 袁峰 阚瑞峰

Temperature measurement method of high temperature and high pressure flow field based on wavelength modulation spectroscopy technology

Zhang Bu-Qiang Xu Zhen-Yu Liu Jian-Guo Yao Lu Ruan Jun Hu Jia-Yi Xia Hui-Hui Nie Wei Yuan Feng Kan Rui-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 233301 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190515

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190515>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光强与吸收率非线性同步拟合的吸收光谱测量方法

Laser intensity and absorbance measurements by tunable diode laser absorption spectroscopy based on non-line fitting algorithm

物理学报. 2018, 67(5): 057801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171905>

相敏式激光啾啾色散光谱技术在高吸收度情况下的应用

Phase sensitive chirped laser dispersion spectroscopy under high absorbance conditions

物理学报. 2017, 66(12): 120601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.120601>

一种基于双波长的光声测温技术

Photoacoustic temperature measurement based on dual-wavelength method

物理学报. 2017, 66(11): 117802 <https://doi.org/10.7498/aps.66.117802>

基于波长调制技术的高温高压流场温度测量方法*

张步强¹⁾²⁾ 许振宇¹⁾ 刘建国¹⁾ 姚路¹⁾ 阮俊¹⁾ 胡佳屹¹⁾
夏晖晖¹⁾ 聂伟¹⁾²⁾ 袁峰¹⁾²⁾ 阚瑞峰^{3)†}

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

3) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2019年4月9日收到; 2019年9月7日收到修改稿)

温度是衡量燃烧效率的重要参数之一, 温度的测量对工业燃烧过程的节能减排控制和发动机状态诊断等都具有重要意义. 可调谐半导体吸收光谱技术是一种非侵入式测量技术, 具有较强的环境适应性, 可实现快速、原位检测. 本文基于 H_2O 在 7185.6, 6807.8 以及 $7444.35/37\text{ cm}^{-1}$ 三条吸收线集成测量系统, 三只激光器为时分复用方式, 选择波长调制技术, 利用扣除背景的 $1f$ 归一化 $2f$ 信号反演燃烧流场温度, 通过直接比较实际测量的谐波信号与建立的吸收模型获得的谐波信号, 实现了某型号发动机模型喷口温度的准确测量, 测量系统时间分辨小于 1 ms, 最高测量温度和最大压强可到 1512 K 和 10.58 atm ($1\text{ atm} = 1.013 \times 10^5\text{ Pa}$), 测量误差小于 5.68%, 验证了该测量方法的实用性和系统的稳定性.

关键词: 吸收光谱, 波长调制, 高温高压, 燃烧流场

PACS: 33.20.Ea, 42.62.Fi, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.68.20190515

1 引言

全球范围降低化石燃料消耗的要求促使高温高压能源系统(煤气化炉、爆震燃烧器、均质压燃发动机等)的发展, 为了研究其复杂的物理过程, 需要对其过程诊断获得温度、组分、流速等流场参数^[1]. 经过 40 多年的发展, 基于可调谐半导体吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)的气体传感技术已成功应用在多种能源系统实际测量, 包括工业过程控制^[2-5]、燃气轮机^[6-9]、内燃机^[10-12]、冲压发动机^[13-16]、爆轰燃烧器^[17-19]等. 吸收光谱方法对恶劣燃烧流场诊断时会面临更多的挑战, 如吸收基线难以获得、光束偏转、非吸收损耗变大、发射干扰以及压力升高带来的谱线展

宽和重叠^[20].

TDLAS 技术可分为直接吸收(direct absorption, DA)和波长调制光谱(wavelength modulation spectroscopy, WMS)两种技术, 由于高频谐波信号对整体抬高和慢变信号不敏感, 波长调制技术更有利于应对高温高压流场带来的挑战. 本文选择燃烧的主要产物之一 H_2O 作为为目标分子, 吸收中心分别为在 7185.6, 6807.8 以及 $7444.35/37\text{ cm}^{-1}$ 附近的三条吸收线, 利用 TDLAS 技术易于小型化的特点集成一套流场诊断系统, 光源部分包括中心波长分别为 1392, 1469 和 1343 nm 的三只激光器, 使用时分复用技术, 激光器注入的锯齿扫描频率为 1.1 kHz, 高频正弦调制频率为 322 kHz, 利用提取的 $1f$ 归一化 $2f$ 信号直接与吸收模型得到的谐波信号比较反演流场温度, 使 WMS- $2f/1f$ 策略成功

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFC0201104)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

应用在高温高压流场诊断中, 实现了最大压强为 10.58 atm (1 atm = 1.013×10^5 Pa) 的流场温度测量, 最大测量误差为 5.68%, 验证了测量系统的稳定性和实用性.

2 理论与原理

2.1 理论部分

一束频率为 ν 的光穿过光程为 L 的气体介质时, 透射光强 I_t 和入射光强 I_0 满足 Beer-Lambert 定律:

$$\tau(\nu) = \frac{I_t}{I_0} = \exp(-\alpha_\nu), \quad (1)$$

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_\nu d\nu = PXLS(T) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_\nu d\nu = PXLS(T), \quad (2)$$

式中 $\tau(\nu)$ 表示透过率, α_ν 表示吸光度, 对于单一跃迁, 吸光度在频域上积分可得积分吸光度 A , L 为吸收光程 (单位为 cm), P 为总压强 (单位为 atm), X 为吸收气体的体积浓度, $S(T)$ 为吸收线在温度 T (单位为 K) 下的线强 (单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$), ϕ_ν 表示吸收线型函数, 其在频域的积分为 1. 根据展宽机制, 实际吸收为多普勒展宽和碰撞展宽综合作用, 故 ϕ_ν 选择 Voigt 线型^[21], 其为高斯线型和洛伦兹线型的卷积, 其中多普勒和碰撞展宽机制的半高宽 (full width at half maximum, FWHM) 可分别表示为:

$$\Delta\nu_D = 7.162 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (3)$$

$$\Delta\nu_c = 2P\gamma, \quad (4)$$

其中 ν_0 (单位为 cm^{-1}) 表示吸收线中心频率, M (单位为 $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) 表示目标分子的摩尔质量, γ (单位为 $\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$) 表示压力展宽系数,

$$\gamma(T) = \gamma(T_0) \left(\frac{T_0}{T} \right)^n, \quad (5)$$

其中 n 表示展宽系数的温度依赖系数. 在波长调制技术中, 激光器波长和频率同时被调制, 为更好描述激光器出光情况, 出光频率 $\nu(t)$ 和强度 $I_0(t)$ 随时间变化的关系可表示为:

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + \sum_{i=1}^2 (a_i + b_i t + c_i t^2) \cos(i\omega t + \theta_i), \quad (6)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0(t) [1 + i_0 \cos(\omega t + \varphi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \varphi_2)], \quad (7)$$

式中 $\bar{\nu}(t)$ 为激光器中心频率; a, b, c 为多项式系数, 并且当 $i = 1$ 时, 表示调制深度 (单位为 cm^{-1}); ω 为角频率 ($\omega = 2\pi f$); θ 表示初相位. 强度表达式中 $\bar{I}_0(t)$ 为激光器中心光强; i_0, i_2 分别为归一化一次和二次调制幅度; φ_1, φ_2 分别是一次和二次调制的初相位. 这些参数均依赖于激光器本身调制特性. 吸收后的强度信号经过解调, 得到扣除背景的 $1f$ 归一化的 $2f$ 信号表达式为^[22]

$$S_{2f/1f\text{-background-subtracted}} = \sqrt{\left(\frac{X_{2f}(t)}{R_{1f}} - \frac{X_{2f}^0(t)}{R_{1f}^0} \right)^2 + \left(\frac{Y_{2f}(t)}{R_{1f}} - \frac{Y_{2f}^0(t)}{R_{1f}^0} \right)^2}, \quad (8)$$

其中 X_{2f}, Y_{2f} 表示经锁相放大器解调得到的 $2f$ 的 X 分量和 Y 分量信号; X_{2f}^0, Y_{2f}^0 表示 $2f$ 的 X 分量和 Y 分量的背景信号; R_{1f}, R_{1f}^0 分别表示双通道解调得到的 $1f$ 信号和背景.

2.2 测量原理

波长调制反演流场参数的原理即将测量信号与建立的模型直接比较, 要求模型中的参数与实际值尽量一致, 包括激光器调制参数以及谱线参数, 根据选线依据定则^[22], 选取的三条吸收线 (其中 $\text{Line}_1, \nu_0 = 7185.6 \text{ cm}^{-1}$; $\text{Line}_2, \nu_0 = 6807.83 \text{ cm}^{-1}$; $\text{Line}_3, \nu_0 = 7444.35/37 \text{ cm}^{-1}$) 谱线参数如表 1 所列.

根据表中的谱线参数, 分别模拟不同压强的吸光度, 结果如图 1 所示. 图 1 中的模拟环境温度为 $T = 1500 \text{ K}$, 水汽浓度 $X = 5\%$, 光程 $L = 10 \text{ cm}$, 可以看到压力升高带来的吸收线自身展宽变大, 临近吸收谱线重叠使独立吸收线很难分辨, 直接吸收需要获取吸收线的完整特征, 并且需要零吸收基线部分, 该方法在压力升高后很难测到精确流场参数. 本文采用波长调制的方法, 根据选线法则^[23], 使 Line_2 & Line_1 及 Line_2 & Line_3 组成两组吸收线对, 模拟压强 $P = 5 \text{ atm}$, 水汽浓度为 $1\% \sim 20\%$, 温度为 $1000 \sim 2000 \text{ K}$, 两组吸收线对 $2f/1f$ 峰值的比值变化如图 2 所示 (C_1 表示 Line_2 与 Line_1 的 $2f/1f$ 的峰值比, C_2 表示 Line_2 与 Line_3 的 $2f/1f$ 的峰值比).

从图 2 中可以看出, 压强固定时, 两对吸收线的 $2f/1f$ 峰值比随温度和浓度变化, 并且同一浓度

表 1 三条吸收线谱线参数
Table 1. Spectroscopic parameters of three absorption lines.

ν_0/cm^{-1}	$S(T_0)@296\text{ K}/\text{cm}^{-2}\cdot\text{atm}^{-1}$	E''/cm^{-1}	$\gamma_{\text{air0}}/\text{cm}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$	$\gamma_{\text{self}}/\text{cm}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$
7185.60	1.91×10^{-2}	1045.06	0.041	0.198
6807.83	6.03×10^{-6}	3319.45	0.098	0.183
7444.35/37	1.10×10^{-3}	1774/1806	0.019/0.0153	0.2/0.23

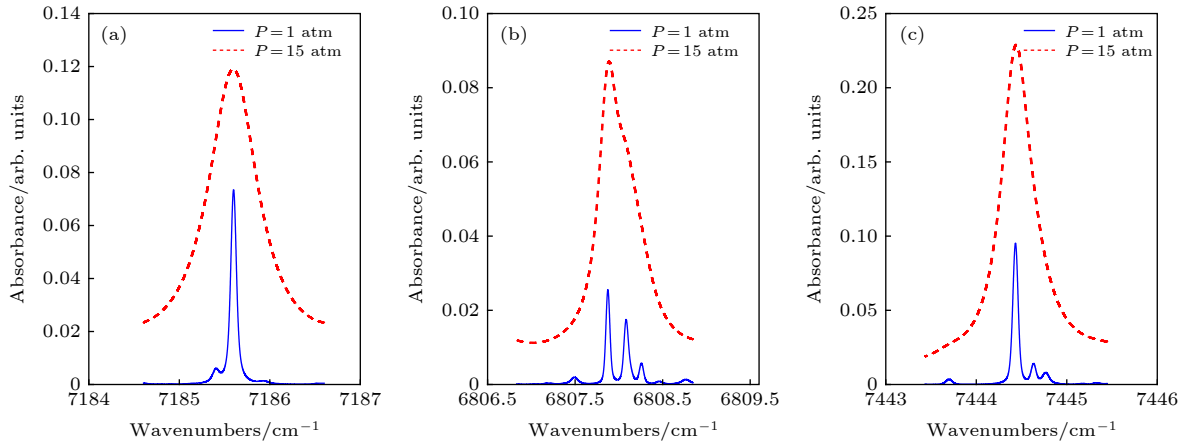


图 1 模拟不同压强下的吸光度 (a) Line₁; (b) line₂; (c) line₃.
Fig. 1. Simulated absorbance at different pressures: (a) Line₁; (b) line₂; (c) line₃.

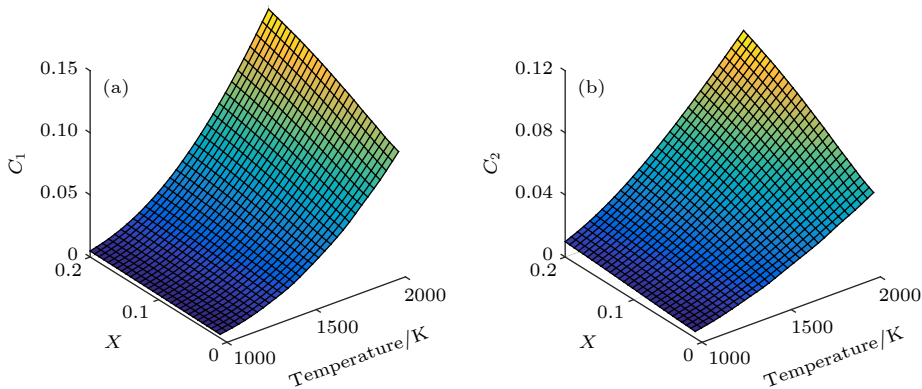


图 2 模拟两对吸收线 2f/1f 峰值比随温度和浓度变化 (a) Line₂ & Line₁; (b) Line₂ & Line₃.
Fig. 2. The peak ratio of 2f/1f of the two pairs of absorption lines obtained by simulation varies with temperature and concentration: (a) Line₂ & Line₁; (b) Line₂ & Line₃.

下, 随温度单调变化, 基于此, 可利用所选吸收线对谐波信号峰值比测量流场温度. 波长调制反演流场温度的本质是将测量和模拟的吸收线对的谐波信号直接比较, 将模型中的水汽浓度和温度轮换迭代, 流程如图 3 所示. 具体过程如下:

1) 为避免激光器出光强度拟合带来的误差, 选择无吸收强度信号作为 $I_0(t)$, 结合谱线参数和初始流场条件 (压强 P 、组分浓度 X_0 、温度 T_0), 获得经流场吸收的模拟信号 $I_{t,\text{sim}}(t)$;

2) 将模拟信号 $I_{t,\text{sim}}(t)$ 和测量的透射信号

$I_{t,\text{mea}}(t)$ 经过解调获得对应扣除背景的归一化谐波信号 $S_{2f/1f,\text{sim}}$ 和 $S_{2f/1f,\text{mea}}$;

3) 模拟和测量的吸收线对的谐波信号峰值比分别为 C_{sim} 和 C_{mea} , 固定初始压强和水汽浓度, 根据相同条件下谐波信号峰值比随温度单调变化, 更新温度, 用 T_1 代替 T_0 ;

4) 由其中一条吸收线的峰值, 根据公式 $X_1 = (P_{\text{mea}}/P_{\text{sim}})/X_0$ 更新水汽浓度, 其中 P_{sim} , P_{mea} 表示模拟和测量的谐波信号峰值;

5) 验证 $|C_{\text{sim}} - C_{\text{mea}}| < \varepsilon$ & $|P_{\text{sim}} - P_{\text{mea}}| < \varepsilon_1$

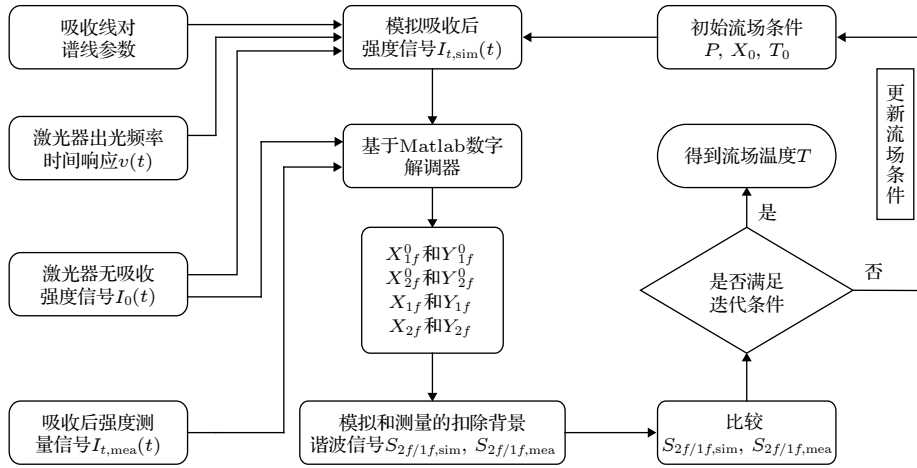


图 3 温度反演流程

Fig. 3. Process of temperature inversion.

迭代条件是否成立, 如果成立, 则上一步的温度为流场温度, 不成立, 则重复 3)、4) 两步, 直到迭代条件成立, 通过模拟, 正演得到三条吸收线的谐波信号, 利用上述方法再反演温度, 两对吸收均可得到预设温度值.

3 实验装置

为实现现场便携式测量, 在实验室集成高温高压流场测量系统, 系统分为光源主机部分和信号处理两部分 (两部外壳分尺寸均为 250 mm × 229 mm × 89 mm). 主机部分利用分时复用集成三只激光器, 激光器均为 NEL 公司生产的分布反馈式半导体激光器, 工作中心波长分别在 1392,

1469, 1343 nm 附近, 同时包括温控、电流控制和合束器; 信号处理部分包括光源分束, 光耦探测器及放大电路, 探测器为 GPD 公司生产, 型号为 GAP1000 FC, 现场试验装置如图 4 所示.

由于常温环境 $\nu_0 = 7185.6 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收线相对较强, 无法避免常温段水汽吸收背景, 故系统中加入 $\lambda = 1343 \text{ nm}$ 的激光器, 使 Line₂ & Line₃ 作为备用吸收线对. 三只激光器采用分时复用方式, 每只激光器的扫描频率为 3.3 kHz, 均采用正弦调制方式, 调制频率均为 322 kHz, 系统的时间分辨为 0.9 ms. 测量区域为某型号发动机模型喷口, 垂直气流方向两侧开孔, 使激光通过测量区域, 吸收后的光经多模光纤传输到信号处理部分的探测器, 经放大接入采集卡 (美国 NI 公司生产, 型号: PCI-5105).

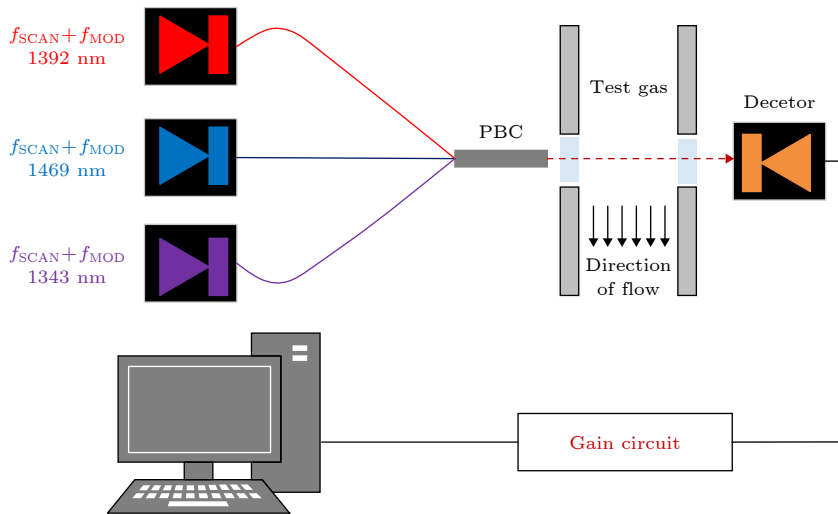


图 4 现场实验装置图

Fig. 4. Device diagram of field test.

发动机点火后, 燃料质量流量的改变使喷口燃烧流场发生变化, 达到某工况时, 流场处于稳定状态, 压力传感器和热电偶得到的压强和温度可同时被采集. 每个工况利用光谱方法采集三组吸收信号, 每组可得到连续的 200 个温度值, 试验过程中共采集三个工况的数据, 各工况状态参数如表 2 所列.

表 2 不同工况参数

Table 2. Parameters of different operating conditions.

State	Pressure/atm	Flow/kg·s ⁻¹	Average temperature/K
1	3.49	0.511	958
2	7.04	0.997	1420
3	10.58	1.48	1512

4 结果与分析

激光器出光频率-时间响应对波长调制技术非常关键, 现场试验前对三只激光器的调制参数进行标定, 根据激光器出光强度增加频率下降的特性,

使激光通过固体标准具, 图 5 为 $\lambda = 1469 \text{ nm}$ 的激光器标定结果图线.

图 5 中“*”表示通过标准具的干涉峰, 实线表示根据 (6) 式给出的模型得到的拟合结果, 该激光器的频率-时间响应为

$$\begin{aligned} \nu(t) = & 1.367 - 3877t + 5.585t^2 - 3.169t^3 \\ & + (-0.07888 - 81.03t) \times \cos(2\pi ft + 2.145) \\ & + (0.009544 - 9.635t) \times \cos(4\pi ft + 2.538). \end{aligned}$$

同样的方法可得到 $\lambda = 1392 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 1343 \text{ nm}$ 两只激光器的频率时间响应, 用于吸收模型构建. 图 6 为现场第 2 工况采集的某组原始吸收信号和解调得到的谐波信号.

图 6 中上部分表示经吸收的强度信号, 按时序分别为 $\lambda = 1392 \text{ nm}$, $\lambda = 1469 \text{ nm}$, $\lambda = 1343 \text{ nm}$ 三只激光器, 下部分表示解调得到的谐波信号, Peak₁, Peak₂, Peak₃ 分别对应 $\nu_0 = 7185.6 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_0 = 6807.8 \text{ cm}^{-1}$, $\nu_0 = 7444.35/37 \text{ cm}^{-1}$ 三条吸收线谐

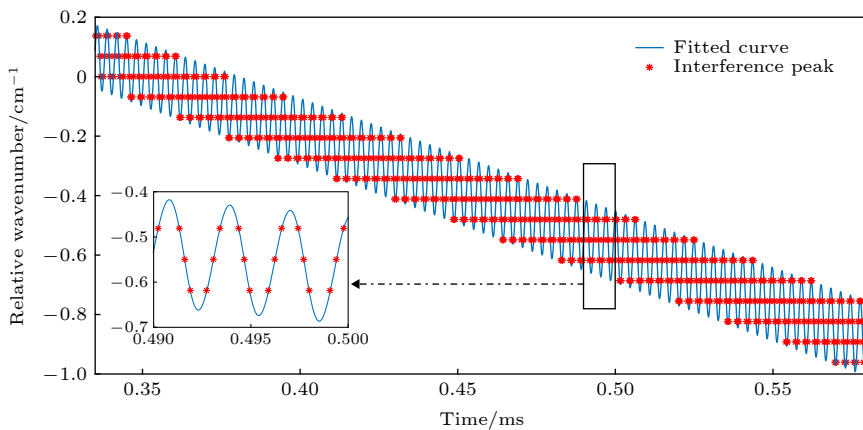


图 5 $\lambda = 1469 \text{ nm}$ 的标定结果

Fig. 5. Calibration result of $\lambda = 1469 \text{ nm}$.

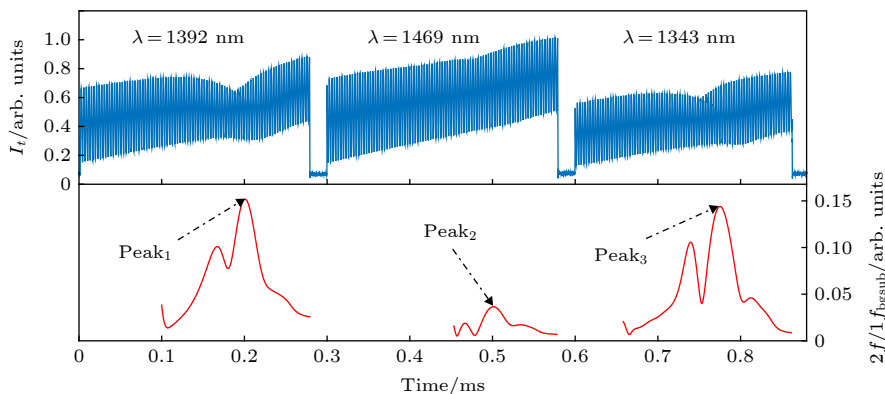


图 6 原始吸收信号(上)和谐波信号(下)

Fig. 6. Original absorption signal (top) and harmonic signal (bottom).

波信号的峰值. 可明显看出光强信号由于辐射整体抬高, 调制技术对整体偏移或信号缓慢变化不敏感, 锁定需要的谐波信号峰位置, 即可用于反演燃烧场温度. 吸收线低态能级不同, 线强最大值对应的温度也不同, 并且低态能级越高对应的温度值越大, 三条低态能级 $E''_{\text{Line}_2} > E''_{\text{Line}_3} > E''_{\text{Line}_1}$. 测量段两侧各有 1.0 cm 光路传输, 该部分温度随测量段温度升高而升高, 反演温度时需扣除其影响, 工况 1 时, 背景吸收部分温度较低, 可利用 Line₁ & Line₂ 反演温度, 工况 2 和工况 3 时, 背景吸收部分温度较工况 1 升高, Line₁ 吸收更强, 对背景扣除不利, 选用 Line₂ & Line₃ 反演温度, 三个工况的温度测量结果如图 7 所示.

图 7 中将每个工况连续采集的三组数据得到的温度连续画在一起, 可以看出每个工况的温度值相对稳定, 工况 1, 2, 3 温度测量结果的标准差分别为 $S_1 = 14.83 \text{ K}$, $S_2 = 21.43 \text{ K}$, $S_3 = 29.83 \text{ K}$, 验证了测量系统的稳定性和重复性. 将每个工况的三组测量结果分别计算平均温度、绝对误差、相对误差, 结果如表 3 所列.

表 3 中数据显示, 同一工况各组的测量结果差异较小, 相对误差最大值出现在工况 3 的第三组数

据: 5.92%. 工况 1, 2, 3 的各组测量误差及总的测量误差均依次变大, 工况 1 的相对误差只有 2.26%, 而工况 3 的相对误差达到了 5.68%, 这是由于工况随时间变化时, 燃烧场压强和温度均升高, 测量环境越发恶劣, 精确测量的挑战变大. 另外测量段外侧背景吸收部分更为复杂, 对吸收的贡献随着测量段压强升高而变大, 背景扣除的难度变大, 测量结果验证了利用吸收光谱谐波信号峰值反演高温高压环境温度的方法, 同时集成系统的实用性得到验证.

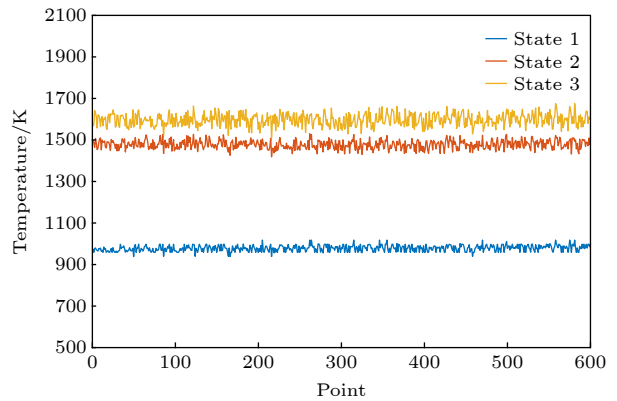


图 7 三种不同工况温度测量结果

Fig. 7. Temperature measurement results of three different working conditions.

表 3 测量结果
Table 3. Measurement result.

	State & illustrate	State 1	State 2	State 3
First group	Average temperature/K	975.41	1481.29	1596.33
	Absolute error/K	17.41	61.29	84.33
	Relative error/%	1.82	4.32	5.58
Second group	Average temperature/K	980.57	1473.66	1595.77
	Absolute error/K	22.57	53.66	83.77
	Relative error/%	2.36	3.78	5.54
Third group	Average temperature/K	982.91	1481.46	1601.50
	Absolute error/K	24.91	61.46	89.50
	Relative error/%	2.60	4.33	5.92
Total	Average temperature/K	979.63	1478.80	1597.87
	Absolute error/K	21.63	58.80	85.87
	Relative error/%	2.26	4.14	5.68

5 总 结

水分子作为重要的燃烧产物之一, 在中红外波段具有丰富的跃迁吸收, 不同的低态能级使其吸收

线线强随温度变化不同, 单一吸收线线强随温度为非单调变化, 而合适的吸收线对峰值比随温度单调变化, 反映在波长调制技术中, 即扣除背景的 $2f/1f$ 信号峰值比随温度单调变化. 利用扫描式波长调制技术测量了高温高压流场温度, 利用

TDLAS 技术易于集成的特点实现了小型化, 选择 H_2O 为目标分子, 利用时分复用方式集成三只近红外激光器, 与常规的双波长测量相比, 增加了备用方案, 成功解决了现场测量的背景扣除问题. 与单纯高温流场相比, 压力提高, 同时增加了测量难度, 文中利用吸收模型和实测信号的直接比较, 通过迭代方式实现了高温高压流场的测量, 并成功应用于现场测量中, 实现了温度的准确测量, 验证了该测量方法的准确性和系统的稳定性. 恶劣流场的诊断, 一直是相关研究的难点, 利用谐波信号峰值迭代的方法为该类型流场诊断提供了参考. 同时, 对更高压强、更高温度的流场诊断还未得到验证, 组分浓度、流速等其他流场参数可在未来研究中同时测量, 实现恶劣流场多参数的同时测量.

参考文献

- [1] Goldenstein C S, Spearrin R M, Schultz I A, Jeffries J B, Hanson R K 2014 *Meas. Sci. Technol.* **25** 055101
- [2] Chao X, Jeffries J B, Hanson R K 2011 *Proc. Combust. Inst.* **33** 725
- [3] Chao X, Jeffries J B, Hanson R K 2012 *Appl. Phys. B* **110** 359
- [4] Ortwein P, Woiwode W, Fleck S, Eberhard M, Kolb T, Wagner S, Gisi M, Ebert V 2010 *Exp. Fluids* **49** 961
- [5] Sun K, Sur R, Chao X, Jeffries J B, Hanson R K, Pummill R J, Whitty K J 2013 *Proc. Combust. Inst.* **34** 3593
- [6] Caswell A W, Kraetschmer T, Rein K, Sanders S T, Roy S, Shouse D T, Gord J R 2010 *Appl. Opt.* **49** 4963
- [7] Li H, Wehe S D, McManus K R 2011 *Proc. Combust. Inst.* **33** 717
- [8] Li H, Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *Proc. Combust. Inst.* **31** 3215
- [9] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K, Hinckley K M, Woodmansee M A 2005 *Appl. Phys. B* **82** 469
- [10] Witzel O, Klein A, Meffert C, Schulz C, Kaiser S A, Ebert V 2015 *Proc. Combust. Inst.* **35** 3653
- [11] Witzel O, Klein A, Wagner S, Meffert C, Schulz C, Ebert V 2012 *Appl. Phys. B* **109** 521
- [12] Wright P, Terzija N, Davidson J L, Garcia-Castillo S, Garcia-Stewart C, Pegrum S, Colbourne S, Turner P, Crossley S D, Litt T 2010 *Chem. Eng. J.* **158** 2
- [13] Goldenstein C S, Schultz I A, Spearrin R M, Jeffries J B, Hanson R K 2014 *Appl. Phys. B* **116** 717
- [14] Goldenstein C S, Strand C L, Schultz I A, Sun K, Jeffries J B, Hanson R K 2014 *Appl. Opt.* **53** 356
- [15] Schultz I A, Goldenstein C S, Mitchell Spearrin R, Jeffries J B, Hanson R K, Rockwell R D, Goyne C P 2014 *J. Propul. Power* **30** 1595
- [16] Spearrin R M, Goldenstein C S, Schultz I A, Jeffries J B, Hanson R K 2014 *Appl. Phys. B* **117** 689
- [17] Goldenstein C S, Almodóvar C A, Jeffries J B, Hanson R K, Brophy C M 2014 *Meas. Sci. Technol.* **25** 174
- [18] Ma L, Cai W, Caswell A W, Kraetschmer T, Gord J R 2009 *Opt. Express* **17** 8602
- [19] Strand C L 2014 *Ph. D. Dissertation* (California: Stanford University)
- [20] Goldenstein C S 2014 *Ph. D. Dissertation* (California: Stanford University)
- [21] Hui A K, Armstrong B H, Wray A A 1978 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **19** 509
- [22] Li N, Weng C S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070701 (in Chinese) [李宁, 翁春生 2011 物理学报 **60** 070701]
- [23] Lan L J, Ding Y J, Jia J W, Du Y J, Peng Z M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 083301 (in Chinese) [蓝丽娟, 丁艳军, 贾军伟, 杜艳君, 彭志敏 2014 物理学报 **63** 083301]

Temperature measurement method of high temperature and high pressure flow field based on wavelength modulation spectroscopy technology*

Zhang Bu-Qiang¹⁾²⁾ Xu Zhen-Yu¹⁾ Liu Jian-Guo¹⁾ Yao Lu¹⁾ Ruan Jun¹⁾
Hu Jia-Yi¹⁾ Xia Hui-Hui¹⁾ Nie Wei¹⁾²⁾ Yuan Feng¹⁾²⁾ Kan Rui-Feng^{3)†}

1) (*Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(Received 9 April 2019; revised manuscript received 7 September 2019)

Abstract

Temperature is one of the important parameters to measure the combustion efficiency. The measurement of temperature is of great significance for saving energy and reducing emission in industrial combustion process and diagnosing the engine state. The tunable diode laser absorption spectroscopy is a non-invasive measurement technology with strong environmental adaptability for fast, in-situ detection. Based on the three absorption lines of H₂O at 7185.6 cm⁻¹, 6807.8 cm⁻¹ and 7444.35/37 cm⁻¹, the wavelength modulated spectrum absorption model is established and laboratory-calibrated; using the background-subtracting WMS-2f/1f method and the best fit method, the temperature is measured. The outlet temperature of the single-head combustion chamber is accurately realized. The outlet temperature of the single-sector combustion chamber is also accurately measured. The measurement is verified in a pressure range of 3.39–10.58 atm and a temperature range of 958–1512 K. The time resolution of the measurement system is less than 1 ms, and the measurement error is less than 5.68%, thus verifying the practicality of the measurement method and the stability of the measurement system.

Keywords: absorbance spectroscopy, wavelength modulation spectroscopy, high temperature and pressure, combustion flow field

PACS: 33.20.Ea, 42.62.Fi, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.68.20190515

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFC0201104).

† Corresponding author. E-mail: kanruiheng@aiofm.ac.cn