

## 激光与光电子学进展

## 非分光多波长调制吸收光谱测量方法

石逸凡, 李宁\*, 黄孝龙, 康杨, 李灿, 翁春生

南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094

**摘要** 针对激光吸收光谱技术波长调制方法测量技术,提出了一种非分光多谱线二次谐波测量方法。通过调整谱线间相对位置,在无需光栅等分光装置条件下可实现对多谱线调制信号的解调制,进而在线测量气体温度。基于  $7185.60\text{ cm}^{-1}/7444.35\text{ cm}^{-1}$   $\text{H}_2\text{O}$  吸收谱线讨论了调制系数和谱线间相对位置对于测量的影响,结合调制信号频谱图分析了不同调制频率工况下的二次谐波提取方法。利用数值仿真方法建立了脉冲爆轰过程复杂流场变化模型,采用提出方法对脉冲爆轰过程燃气温度进行了测量,验证了该方法的正确性。研究结果对复杂环境条件下波长调制测量方法的应用具有重要意义。

**关键词** 傅里叶光学与信号处理; 波长调制; 二次谐波; 脉冲爆轰; 温度测量

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212922

## Non-Dispersive Multi-Wavelength Modulation Absorption Spectrum Measurement Method

Shi Yifan, Li Ning\*, Huang Xiaolong, Kang Yang, Li Can, Weng Chunsheng

*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*

**Abstract** Aiming at improving the measurement of wavelength modulation via laser absorption spectroscopy, a non-dispersive multi-wavelength second-harmonic measurement method is proposed. By adjusting the relative position between the spectral lines, the demodulation of the multispectral line modulation signal can be achieved without the need for a grating or other spectroscopic devices, and the gas temperature can then be measured online. Based on the  $7185.60\text{ cm}^{-1}/7444.35\text{ cm}^{-1}$   $\text{H}_2\text{O}$  absorption spectrum, the influence of the modulation coefficient and the relative position between the spectral lines on the measurement are discussed. Further, the second-harmonic extraction method under different modulation frequency conditions is analyzed using the modulation signal spectrogram. A numerical simulation method is used to establish a complex flow-field change model in the pulse detonation process. The proposed method is used to measure gas temperature during the pulse detonation process, and its correctness is verified in this study. The research results are of great significance to the measurement of wavelength modulation under complex environmental conditions.

**Key words** Fourier optics and signal processing; wavelength modulation; second harmonic; pulse detonation; temperature measurement

## 1 引言

脉冲爆轰发动机(PDE)是一种新型发动机,对其工作过程中产生的燃气流场组分温度浓度等指标进行分析,能够更好地研究其工作机理,为评估工作性能提供数据支持<sup>[1-5]</sup>。在PDE高温高压的工作环境下,常规的接触式测量技术难以适用,可调谐半导体激光吸收

光谱(TDLAS)技术作为非接触气体测试技术,具有灵敏度高、分辨率高、响应速度快和环境适应性强等优点,适用于爆轰流场的在线检测<sup>[6-8]</sup>。

目前已经有许多学者将TDLAS技术应用于不同环境下的气体测量,主要分为直接吸收法与波长调制法两种。阚瑞峰等<sup>[9-10]</sup>选取了1391.7 nm中心处单根谱线采取直接吸收法,搭建双光路测量系统实现了风

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-12-01; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2022-01-04

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK20190439)、中央高校基本科研业务费专项(30919011258)

通信作者: \*lining@njjust.edu.cn

洞中  $H_2O$  速度测量,并且还应用直接吸收法对平焰炉中的  $H_2O$  温度进行测量;张雅琪等<sup>[11]</sup>应用直接吸收法,选取  $7153.7208\text{ cm}^{-1}/7153.7488\text{ cm}^{-1}$  和  $7154.353\text{ cm}^{-1}/7154.3538\text{ cm}^{-1}$  两组谱线对火焰中  $H_2O$  浓度进行测量;吕晓静等<sup>[12-14]</sup>应用直接吸收法,通过测量  $CO$ 、 $H_2O$  等气体组分的浓度、温度以及速度参数,对气液两相脉冲爆轰发动机的工作性能进行研究;Rieker 等<sup>[15-16]</sup>在高温条件下应用波长调制技术选用 4 条谱线对  $H_2O$  进行温度测量;Li 等<sup>[17]</sup>通过一次谐波标定二次谐波方法,实现了冲击管中  $H_2O$  的浓度测量。

波分复用技术可在同一根光纤中同时传输多波长光信号,相比时分复用技术能保证更高的测量效率<sup>[18-20]</sup>。但波分复用技术后续需要通过光栅等手段将不同波长的信号分离,且波长相近时可能会导致相互之间产生干扰<sup>[21-23]</sup>,测量系统相对复杂,对测量环境要求较高。

本文提出一种基于未分光多谱线解调的波长调制吸收光谱爆轰燃气测量方法,通过解调合成透射信号,无需通过分光装置来实现吸收谱线的分离,简化了测试系统,适用于复杂现场测量,具有重要研究意义和应用前景。

## 2 波长调制分离解调方法

激光吸收光谱技术以分子吸收光谱理论为基础,一束频率连续变化的平行光穿透气体介质后,气体会对特定频率的光产生不同程度的吸收<sup>[24-26]</sup>,激光强度会相应减弱,该过程遵循比尔朗伯定律<sup>[15]</sup>:

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp \left\{ - \int_0^L P(l) X(l) S_\nu [T(l)] \phi(\nu) dl \right\}, \quad (1)$$

式中: $P(l)$ 、 $X(l)$ 和 $T(l)$ 分别为总静压、摩尔分数和温度; $L$ 为光程长度; $\phi(\nu)$ 为归一化的分子吸收线型函数; $S_\nu$ 为谱线强度,代表特征谱线对激光吸收度的强弱,对于特定的分子吸收谱线,其谱线强度大小只与温度有关,可通过下式进行计算<sup>[6]</sup>:

$$S_\nu(T) = S_\nu(T_0) \frac{T_0}{T} \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \frac{\exp\left(-\frac{hcE_\nu^*}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{hcE_\nu^*}{kT_0}\right)} \times \frac{1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_0}\right)}, \quad (2)$$

式中:参考温度  $T_0$  为 296 K,该温度下谱线强度可通过

HITRAN 光谱数据库得到; $Q(T)$ 为分子内部分割函数,可通过多项式拟合求近似值; $h$ 是普朗克常数; $k$ 为玻尔兹曼常数; $c$ 为光的传播速度; $E_\nu^*$ 为低态跃迁能,代表分子能级跃迁时所吸收的能量; $\nu$ 为中心频率。式中最后一项为激励辐射,在近红外波段近似为 1。

分布式反馈 (DFB) 激光器在高频电流驱动下激光强度可以描述为<sup>[6]</sup>

$$I_0 = a_2 \nu^2 + a_1 \nu + a_0, \quad (3)$$

式中, $a_2$ 、 $a_1$ 和 $a_0$ 分别是激光强度扫描波长非线性系数、线性系数和常数。波长调制技术是通过在锯齿扫描信号上叠加高频正弦信号驱动激光器实现的。激光器出射频率为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

式中: $\nu$ 为中心频率; $a$ 为调制深度; $f$ 为调制频率。出射激光强度表示为

$$I_0(t) = \bar{I}_0 + i_0 \cos(2\pi ft + \varphi). \quad (5)$$

定义透射光强与入射光强的比值  $\tau(\nu)$  为

$$\tau(\nu) = \tau[\bar{\nu} + a \cos(2\pi ft)], \quad (6)$$

傅里叶级数展开为

$$\tau[\bar{\nu} + a \cos(2\pi ft)] = \sum_{k=1}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, a) \cos(k2\pi ft), \quad (7)$$

式中:

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) d\theta, \quad (8)$$

$$H_k(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cos k\theta d\theta. \quad (9)$$

根据比尔朗伯定律计算得到透射光强乘以参考信号获得二次谐波的  $X$  分量和  $Y$  分量为

$$\begin{cases} X_{2f} = I_t(t) \cos(2\omega t) \\ Y_{2f} = I_t(t) \sin(2\omega t) \end{cases}, \quad (10)$$

式中, $\omega$ 为角频率,大小为  $2\pi f$ 。扣除背景信号后,二次谐波为<sup>[9]</sup>

$$S_{2f} = \sqrt{(X_{2f} - X_{2f}^0)^2 + (Y_{2f} - Y_{2f}^0)^2} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left| H_2 - \frac{i_1}{2}(H_1 + H_3) \right|, \quad (11)$$

式中: $G$ 为探测器增益系数; $H_1$ 、 $H_3$ 为奇函数,在中心处为 0。 $H_2$  值为

$$H_2 = -\frac{PXS(T)L}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\nu + a \cos \theta) \cos 2\theta d\theta. \quad (12)$$

二次谐波峰值与气体浓度成正比关系。定义调制系数  $m$ , 其大小为两倍的调制幅度除以线宽  $\Delta\nu_c$ 。Reid 等<sup>[27]</sup>给出了激光透射率的傅里叶二次谐波表达式为

$$H_2(x, m) = \frac{2XLPS(T)}{\pi\Delta\nu_c} \left[ \frac{\sqrt{2}(M+1-x^2)\sqrt{M+\sqrt{M^2+4x^2}} + 4x\sqrt{\sqrt{M^2+4x^2}-M}}{m^2\sqrt{M+4x^2}} - \frac{4}{m^2} \right], \quad (13)$$

式中,  $M=1-x^2+m^2$ , 在中心处  $x=0$ , 此时有二次谐波峰值  $P_{2f}$ :

$$P_{2f} = \frac{I_0 S(T) PXL}{\pi \Delta \nu_c} \left\{ \frac{2}{m^2} \left[ \frac{2+m^2}{(1+m^2)^{\frac{1}{2}}} - 2 \right] \right\}. \quad (14)$$

通过查询 HITRAN 数据库中两条谱线的加宽系数可知, 在一定浓度范围内, 线宽近似相等,  $m$  也近似相等,

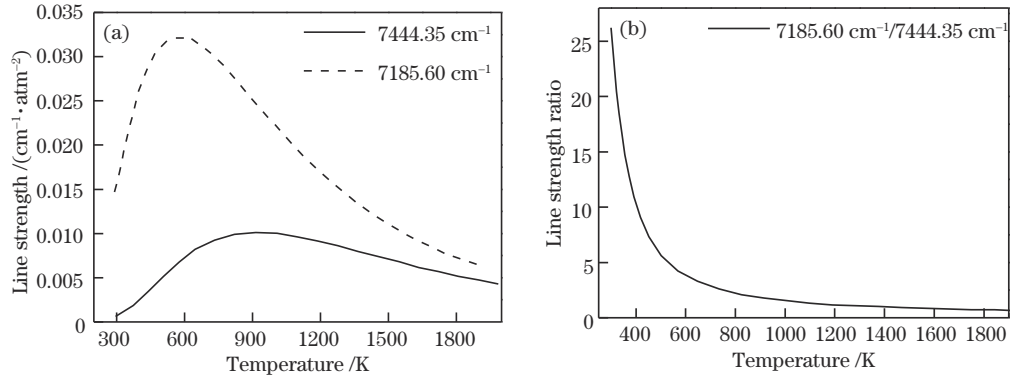


图 1 谱线强度/谱线强度比与温度的对应关系(7185.60 cm<sup>-1</sup>/7444.35 cm<sup>-1</sup>)。(a)谱线强度;(b)谱线强度比  
Fig. 1 Correspondence between line strength/line strength ratio and temperature (7185.60 cm<sup>-1</sup>/7444.35 cm<sup>-1</sup>). (a) Line strength; (b) line strength ratio

因单一激光器波长扫描范围较小, 且气体吸收谱线并不接近, 所以需要波分复用技术将不同波段的激光耦合进一根光纤内, 经过气体吸收区后再将不同波段分开, 目前主要通过光栅等手段对合波后的激光进行分光处理。本文不再通过借助后续光路设计来实现分光, 对经过吸收的透射信号解调得到二次谐波信号, 调节吸收谱线中心位波长位置, 尽可能减少不同谱线之间叠加带来的影响, 实现二次谐波信号的分离。

### 3 仿真分析

#### 3.1 非分光多谱线波长调制吸收光谱特征

首先对非分光多谱线波长调制吸收光谱特征进行分析。选取 7185.60 cm<sup>-1</sup>/7444.35 cm<sup>-1</sup> 两条 H<sub>2</sub>O 特征吸收谱线进行扫描, H<sub>2</sub>O 温度设定为 1273 K, 压力为 2 atm, 摩尔分数为 0.1, 测量路径长度为 10 cm。分别对两个波段激光器加载锯齿波信号, 对两条 H<sub>2</sub>O 特征吸收谱线进行扫描, 波长扫描范围分别为 7443.5~7447.5 cm<sup>-1</sup> 与 7182.5~7186.5 cm<sup>-1</sup>, 谱线间距离为 2.25 cm<sup>-1</sup>, 锯齿波扫描频率为 1 Hz。分别加载正弦调制信号, 正弦波调制频率为 1 kHz, 调制系数为 2。通过仿真获取的一个完整扫描周期内的调制吸收光谱信号如图 2 所示。

对采集得到的调制激光吸收光谱信号进行解调制, 解调制结果如图 3 所示。可见, 在未分光的情况下, 可以将两个波段的调制吸收光谱二次谐波信号完全区分, 从而应用于波长调制气体温度测量。根据获取的二次谐波信号, 结合前文中温度测量方法, 可以在线反演得到气体温度值。在上述工况中计算得到的气

可用二次谐波峰值比代替谱线强度比:

$$\frac{P_{2f1}}{P_{2f2}} = R \approx \frac{S_1(T)}{S_2(T)}. \quad (15)$$

HITRAN 数据库中谱线强度随温度变化曲线如图 1 所示 [其中图 1(a) 纵坐标单位中: 1 atm = 1.013 × 10<sup>5</sup> Pa]。由图可知, 谱线强度比随温度单调变化, 可以通过谱线强度比得到温度。

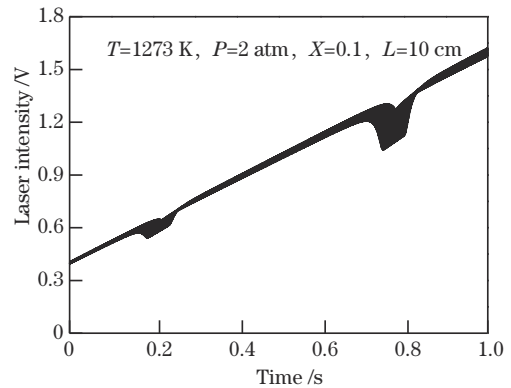


图 2 激光透射信号仿真结果  
Fig. 2 Laser transmission signal simulation result

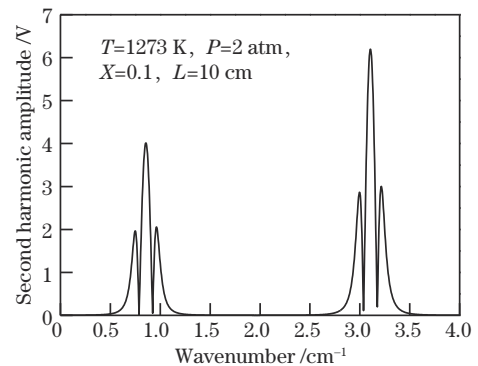


图 3 7185.60 cm<sup>-1</sup>/7444.35 cm<sup>-1</sup> 合波透射信号解调后二次谐波信号值

Fig. 3 Second harmonic signal after demodulation of multiplexed transmission signals of 7185.60 cm<sup>-1</sup>/7444.35 cm<sup>-1</sup>

体温度为 1290 K, 相对误差为 1.34%, 可见在该条件下计算结果相对理想, 误差较低。

### 3.2 调制系数与吸收谱线相对位置对于测量的影响

为了研究调制系数  $m$  对于温度测量的影响。在仿真中保持其他测量工况参数 ( $T=1273$  K,  $P=2$  atm,  $X=0.1$ ,  $L=10$  cm) 不变, 通过改变调制幅度来改变调制系数, 进而考察调制系统对于温度测量精度的影响。

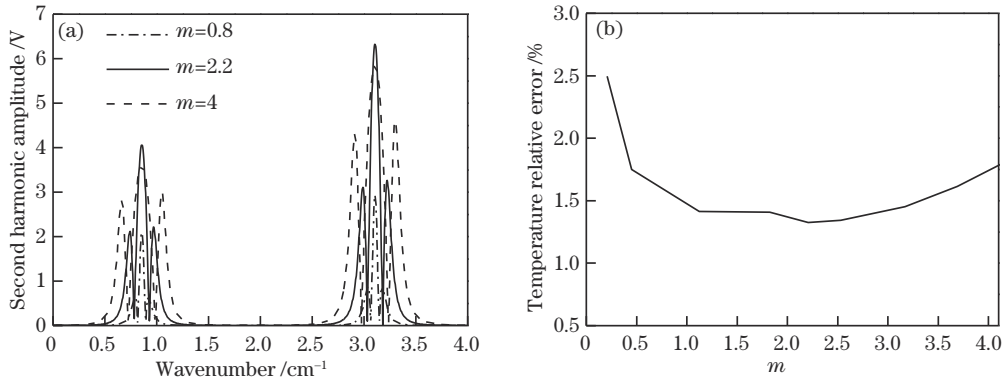


图 4 不同调制系数  $m$  对计算结果的影响。(a) 二次谐波信号; (b) 温度计算相对误差

Fig. 4 Influence of modulation coefficient  $m$  on simulation results. (a) Second harmonic signal; (b) temperature relative error

为了探究两条谱线相对位置对测量信号的影响, 不改变环境工况条件, 只改变激光器初始波长位置, 从而调整两条谱线相对位置, 分析谱线叠加的影响。仿真结果如图 5 所示, 在环境工况条件不变的情况下 ( $T=1273$  K,  $P=2$  atm,  $X=0.1$ ,  $L=10$  cm), 两条谱线宽约为  $0.1 \text{ cm}^{-1}$ 。在当前工况下, 两条谱线相对位置小于两倍线宽时, 两条谱线的二次谐波信号相互叠加, 导致信号失真, 温度计算误差急剧增大, 在谱线相对距离为  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  时, 温度计算误差为 25.08%; 当两条谱线位置大于两倍线宽时, 两条谱线的二次谐波信号互相之干扰较小, 在谱线相对距离为  $0.4 \text{ cm}^{-1}$  时, 温度计算误差为 2.50%, 对温度计算结果影响较小。

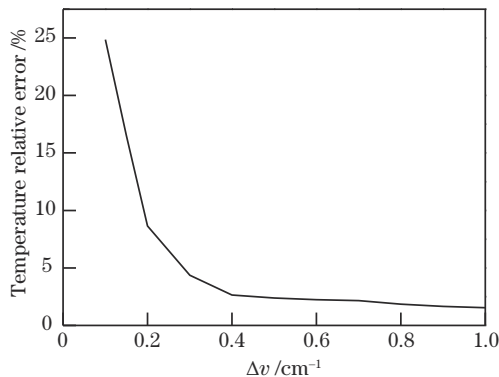


图 5 谱线相对位置对仿真结果的影响

Fig. 5 Influence of relative position of spectral line on simulation result

### 3.3 不同调制频率对于非分光吸收光谱测量的影响

采用非分光波长调制吸收光谱技术进行测量时,

仿真结果如图 4 所示, 当调制系数  $m$  在 2.2 附近时, 二次谐波峰值最大, 信号最为明显, 温度测量误差最低, 相对误差为 1.33%。当调制信号过小时, 解调制信号幅值很小, 导致温度测量误差增加, 当  $m=0.4$  时, 相对误差为 1.76%; 当调制信号过大时, 两条谱线解调制信号发生变形并且加宽严重, 导致谱线间叠加干扰严重, 误差急剧上升。

两条谱线之间的相对位置对于测量结果具有重要影响。当测量环境压力较高或谱线对位置较为接近时, 谱线间会产生明显干扰。为了消除这种干扰, 可以对两条谱线加载不同的调制频率, 从而使得测量在不同的调制频段内同步进行。

对  $7185.60 \text{ cm}^{-1}/7444.35 \text{ cm}^{-1}$  两条  $\text{H}_2\text{O}$  特征吸收谱线在相对位置距离为  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  时分别采用不同调制频率 ( $f_1$  为 800 Hz,  $f_2$  为 1 kHz) 进行扫描, 测量得到非分光时域信号及其频谱如图 6 所示。从时域信号中可以看出, 由于谱线位置较为接近, 在非分光调制时域信号中两条谱线的吸收信号已经叠加至一起, 但吸收光谱时域信号频谱特征却十分明显。

对非分光吸收光谱时域信号的频谱进行细致分析。首先, 在调制信号基频及其倍频位置处出现明显的吸收信号, 这与调制激光吸收光谱理论相吻合。调制吸收光谱的解调制过程就是将特定倍频信号中的吸收光谱信息进行提取; 其次, 在调制信号基频及其倍频位置处信号脉宽较窄 (小于 100 Hz), 属于窄脉冲信号。因此, 当两条谱线调制频率设定为不同值时, 其调制信号基频及其倍频均不重叠, 可以将其中两条谱线不同倍频处的谐波信号准确还原。

针对图 6 中两条谱线的调制频率分别进行解调制, 获取解调制后的二次谐波信号, 如图 7 所示。与同频调制测量结果相比, 不同调制频率可以明显消除非分光吸收光谱测量过程中多条谱线间的相互干扰, 完整还原二次谐波信号, 进而实现气体参数的准确测量。

值得注意的是, 选取的两条吸收谱线调制频率在频谱图中基频与倍频信号间相互重叠时, 会导致解调

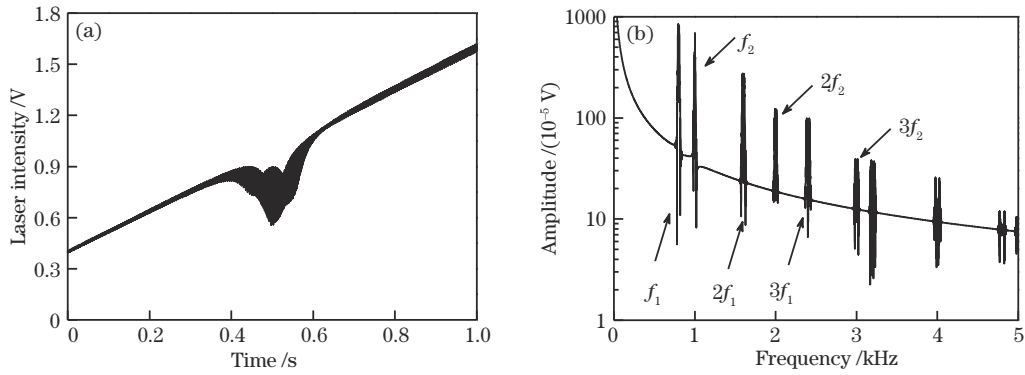
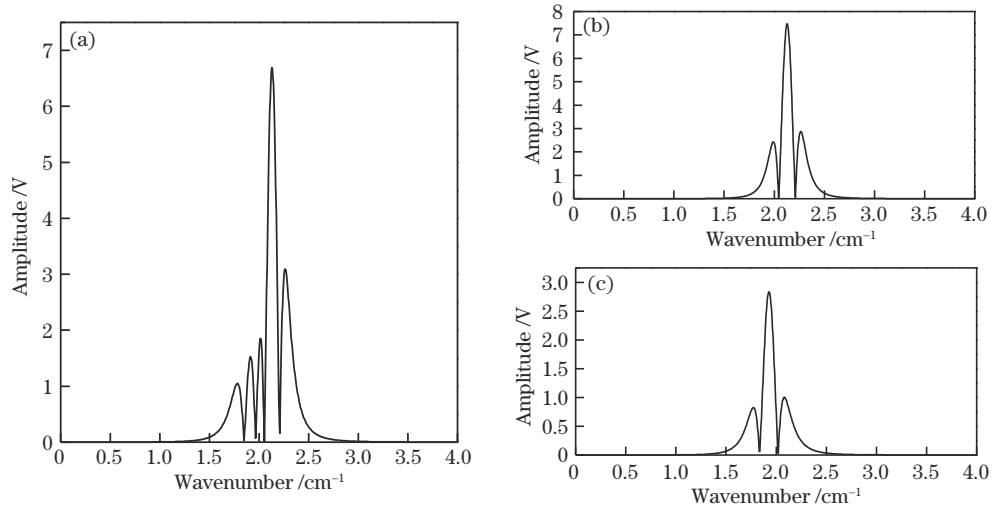


图 6 不同调制频率信号叠加结果。(a)时域图;(b)频域图

Fig. 6 Different modulation frequency signal superposition results. (a) Time domain diagram; (b) frequency domain diagram

图 7 两条谱线相同调制频率与不同调制频率的解调结果。(a)调制频率均为 1 kHz;(b) 7185.60  $\text{cm}^{-1}$  谱线调制频率为 800 Hz;(c) 7444.35  $\text{cm}^{-1}$  谱线调制频率为 1 kHzFig. 7 Demodulation results of two spectral lines with same modulation frequency and different modulation frequencies. (a) Modulation frequencies both 1 kHz; (b) line 7185.60  $\text{cm}^{-1}$  with modulation frequency of 800 Hz; (c) line 7444.35  $\text{cm}^{-1}$  with modulation frequency of 1 kHz

时产生更高阶谐波信号,信号间出现干扰;选取的两条谱线调制频率过近时,会导致解调制时噪声较大,信噪比较低,谐波信号失真,温度测量误差较大。因此两者调制频率不宜选取相近及倍数关系的组合。

#### 4 针对气液两相爆轰流场测量的仿真分析与结果讨论

脉冲爆轰发动机工作时爆轰燃气温度与压力变化范围大,可以用于验证本文波长调制气体测量方法。本文以气液两相脉冲爆轰发动机管口处爆轰燃气为研究对象,采用仿真方法分析不同环境工况条件下的测量效果。

仿真中脉冲爆轰发动机长 1.5 m,内径 80 mm,分别以汽油和氧气为燃料和氧化剂,工作时初始温度设定为 296 K,初始压力设定为 1 atm,燃料填充系数设定为 1。建立考虑粘性影响下的气液两相爆轰流场轴对称控制方程,并采用时空守恒元/求解元(CE/

SE)方法进行求解。计算中设定燃料氧化剂化学反应释放能量被气体吸收,忽略发动机壁面与外界的能量交换。通过仿真计算得到脉冲爆轰发动机爆轰过程管内流场变化全过程,典型时刻的爆轰流场速度场及压力场如图 8 所示。详细物理模型和计算方法可参考文献[28]。

针对脉冲爆轰发动机管口处爆轰燃气发展变化过程进行仿真测量。测试系统方案如图 9 所示。以爆轰燃气中  $\text{H}_2\text{O}$  为检测目标,扫描 7185.60  $\text{cm}^{-1}$ /7444.35  $\text{cm}^{-1}$  两条特征吸收谱线。仿真模拟中锯齿波扫描频率为 20 kHz,波长扫描范围分别为 7183~7187  $\text{cm}^{-1}$  和 7443~7447  $\text{cm}^{-1}$ 。调制正弦波频率分别设置相同频率(500 kHz)和不同频率(400 kHz 和 500 kHz),调制幅度为 0.15 V,对应 1273 K,2 atm 条件下调制系数为 2.1。两束激光信号采用波分复用方式通过光纤进入发射端,透射过测量区域后耦合进入光纤内,并由探测器直接测量接收。测量位置位于距离 PDE 管口 3 cm

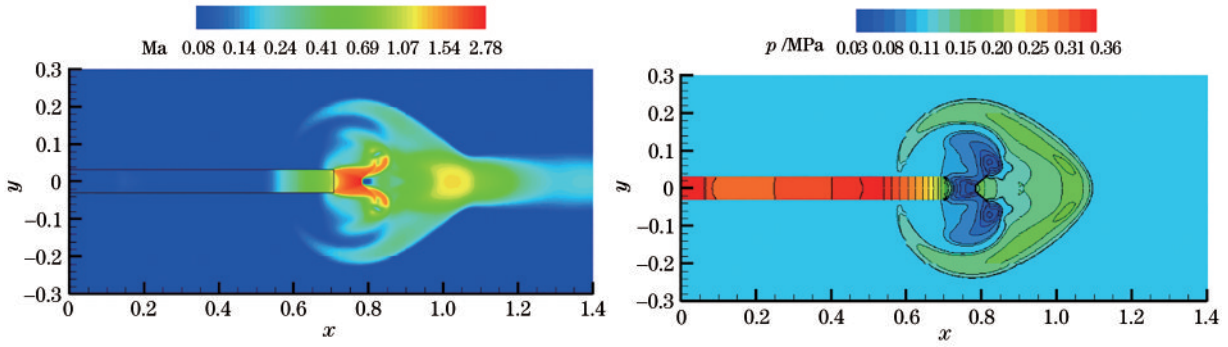


图 8 CE/SE 方法仿真得到的管口速度和压力图。(a)速度图;(b)压力图

Fig. 8 Speed and pressure graphs obtained by CE/SE method simulation. (a) Speed graph; (b) pressure graph

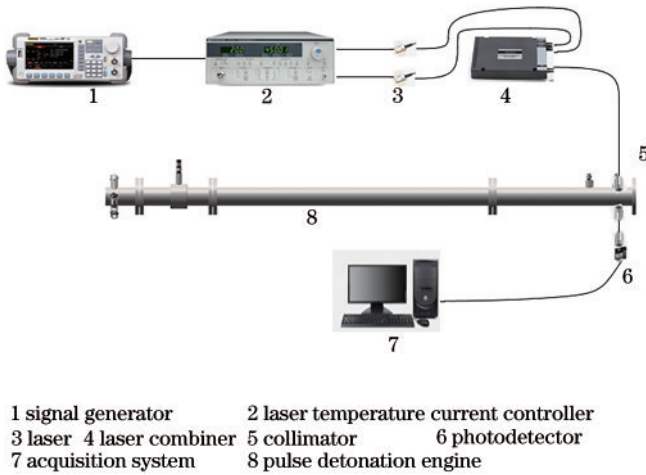


图 9 测量系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of measurement system

处。对透射信号进行解调,得到两条谱线的二次谐波峰值,通过式(15)计算得到谱线强度比,之后根据谱线强度比随温度变化曲线得到气体温度值。

爆轰波到达测量位置后,管内压力由爆轰波阵面压力值迅速下降,2.2 ms 时压力达到最大为 32 atm;在 3.5 ms 后接近常压。与之相比,爆轰燃气温度变化较为缓慢,经过 2.8 ms 后温度达到最大值 2199 K;在爆轰波过后 5 ms 后降低至 1100 K 以下,随后温度下降趋势减缓;在 20 ms 后到达 600 K 左右并趋于稳定。研究中选取爆轰过程的几个典型时刻,对爆轰燃气温度进行了模拟测量。

图 10(a)为两个典型时刻下对两条谱线采用相同调制频率时获得的爆轰燃气二次谐波信号。2.2 ms 时爆轰燃气压力为 32 atm,在高压作用下谱线宽度明显增加并导致其二次谐波出现叠加,此时计算得到的温度值误差为 14.21%。针对 2.2 ms 时刻的工况,采用不同调制频率进行测量分析,可以将两条谱线的二次谐波信号完全分开,如图 10(b)、10(c)所示,此时温度测量误差降低为 9.63%。2.8 ms 时爆轰燃气压力降低,谱线间相互干扰影响明显减小,温度测量误差为 9.18%,此时采用相同调制频率和不同调制频率测量

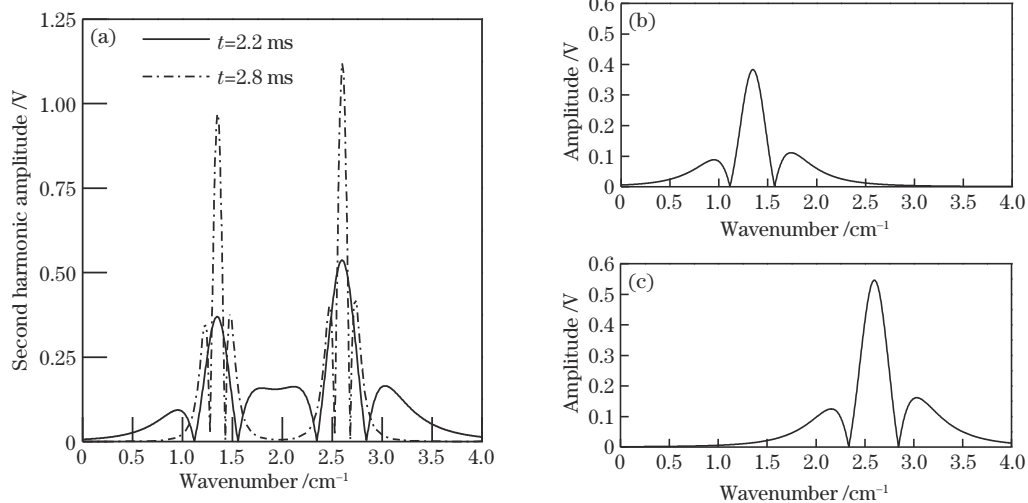


图 10 典型时刻二次谐波解调结果。(a)调制频率均为 500 kHz 解调结果;(b) 2.2 ms 时刻 7444.35  $\text{cm}^{-1}$  谱线调制频率 500 kHz 解调结果;(c) 2.2 ms 时刻 7185.60  $\text{cm}^{-1}$  谱线调制频率 400 kHz 解调结果

Fig. 10 Second harmonic demodulation results at typical moments. (a) Modulation frequencies both 500 kHz demodulation result; (b) line 7444.35  $\text{cm}^{-1}$  with modulation frequency 500 kHz demodulation result at 2.2 ms; (c) line 7185.60  $\text{cm}^{-1}$  with modulation frequency 400 kHz demodulation result at 2.2 ms

结果差异不大。

根据本文方法计算得到温度值与实时温度对比如表 1 所示。基于不同调制频率测量方法在高压工况下

具有优势,温度测量精度明显提升。针对整个爆轰过程,温度测量平均误差为 5.74%,优于基于相同调制频率的测量结果。

表 1 不同时刻通过仿真得到的温度和计算得到的温度比较

Table 1 Comparison of temperatures obtained through simulation and calculated temperatures at different time

Time $t$ /ms	Model temperature $T_M$ /K	Same modulation frequency result $T_s$ /K	Same modulation frequency relative error $e_s$ /%	Different modulation frequency results $T_D$ /K	Different modulation frequency relative errors $e_D$ /%
2.2	1921	1648	14.21	1736	9.63
2.8	2199	1997	9.18	1998	9.14
3.5	1728	1592	7.87	1594	7.75
5.0	1085	1043	3.87	1042	3.96
6.0	1054	1010	4.17	1009	4.26
15.0	910	887	2.53	888	2.41
20.0	620	601	3.06	601	3.06

## 5 结 论

主要研究了可适用于复杂环境测量的非分光多谱线波长调制气体测量方法。在传统波长调制测量方法基础上,通过控制激光器温度和输出电流,使得叠加后透射激光信号中吸收光谱谱线间存在合适的相对距离,进而无需分光即可得到多条调制谱线的二次谐波信号。

利用  $7185.60\text{ cm}^{-1}/7444.35\text{ cm}^{-1}$  谱线对,分别对不同调制系数和谱线间相对距离等工况下的二次谐波信号进行了分析。结果表明,调制系数  $m$  在 2.2 附近时最为合适,调制系数过大或者过小都将引起较大的测量误差。同时,两条谱线相对位置大于两倍线宽时,非分光解调信号对于测量无影响。为了进一步解决在特殊工况条件下谱线间相互叠加干扰对于测量的影响,分别对两条测量谱线加载不同调制频率。理论分析了不同调制频率下调制吸收光谱信号频谱,研究发现调制信号基频及其倍频位置处出现明显的吸收信号,信号脉宽小于 100 Hz;当两条谱线调制频率不同时,两条谱线调制信号的基频及其倍频均不重叠,因此可以将两条谱线二次谐波信号完整提取。

为验证本文波长调制气体测量方法,以气液两相爆轰发动机爆轰过程为研究对象,通过采用 CE/SE 方法获得爆轰过程中燃气参数变化过程,并以此建立模型进行求解。结果表明,非分光多谱线波长调制吸收光谱测量方法可以准确测量爆轰过程燃气温度变化特征,爆轰过程燃气温度测量误差小于 9.63%。该方法适用于基于波长调制的多谱线在线测量领域,无需搭建分光装置即可获取测量结果,优化了测量系统,更加适用于在现场进行实时测量,有广阔的工程应用前景。

## 参 考 文 献

[1] 周伟,翁春生. PDE 出口爆轰波与射流诱发水中流场变化规律的数值仿真[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(3):

167-173.

Zhou W, Weng C S. Numerical simulation of the underwater flow field induced by detonation wave and jet from pulse detonation engine outlet[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(3): 167-173.

- [2] 黄孝龙, 李宁, 翁春生. 多管 PDE 爆轰噪声传播过程物理特性实验研究[J]. 声学学报, 2021, 46(3): 415-422.  
Huang X L, Li N, Weng C S. Experimental study on the physical characteristics of noise propagation process of multi-tube pulse detonation engine[J]. Acta Acustica, 2021, 46(3): 415-422.
- [3] 蒋弢, 翁春生. 进气温度和当量比对脉冲爆轰发动机工作过程影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(1): 29-37.  
Jiang T, Weng C S. Effect of inlet temperature and equivalence ratio on working process of pulse detonation engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 29-37.
- [4] 翁春生, 王杰, 白桥栋, 等. 脉冲爆轰发动机进气压力对爆轰影响的实验研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 1-4.  
Weng C S, Wang J, Bai Q D, et al. Experimental study on effect of inlet pressure on detonation in pulse detonation engine[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 1-4.
- [5] 许桂阳, 翁春生, 李宁. 脉冲爆轰发动机近场爆轰噪声特性研究[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(6): 781-786.  
Xu G Y, Weng C S, Li N. Detonation noise characteristics of pulse detonation engine in near-field[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2014, 38(6): 781-786.
- [6] 吕晓静, 李宁, 徐恩华, 等. 基于 TDLAS 技术的脉冲爆轰发动机管内燃气 CO 的测试研究[J]. 海峡科技与产业, 2018(6): 77-79.  
Lü X J, Li N, Xu E H, et al. Research on carbon monoxide test of gas in pulse detonation engine tube based on TDLAS technology[J]. Technology and Industry Across the Straits, 2018(6): 77-79.
- [7] 吕晓静, 李宁, 徐恩华, 等. 基于 TDLAS 技术结合多普勒测速的脉冲爆轰发动机冲量测试[J]. 科技风, 2018(32): 154-155.

- Lü X J, Li N, Xu E H, et al. Impulse test of pulse detonation engine based on TDLAS technology and Doppler velocity measurement[J]. *Technological Wind*, 2018(32): 154-155.
- [8] 吕晓静, 李宁, 翁春生. 基于激光吸收光谱技术的 PDE 管内燃气测试[J]. *激光杂志*, 2018, 39(10): 137-142.  
Lü X J, Li N, Weng C S. Exhaust diagnostics in PDE tube based on absorption spectrum technology[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(10): 137-142.
- [9] 阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911005.  
Kan R F, Xia H H, Xu Z Y, et al. Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911005.
- [10] 彭于权, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的甲烷/空气预混平焰炉温度测量[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(3): 228-234.  
Peng Y Q, Kan R F, Xu Z Y, et al. Temperature measurement of CH<sub>4</sub>/air premixed flat flame burner based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(3): 228-234.
- [11] 张雅琪. 可调谐半导体激光吸收光谱技术用于火焰中 CO 和 H<sub>2</sub>O 的浓度测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Zhang Y Q. Concentration measurement of CO and H<sub>2</sub>O in flame using tunable diode laser absorption spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [12] Li N, Lü X J, Weng C S. Investigation of self-adaptive algebraic tomography for gas reconstruction in larger temperature range by multiple wavelengths absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(12): 121103-121109.
- [13] 吕晓静, 李宁, 翁春生. 基于多谱线吸收光谱技术的脉冲爆轰发动机管外流场测试研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(3): 624-630.  
Lü X J, Li N, Weng C S. The diagnostics of detonation flow external field based on multispectral absorption spectroscopy technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(3): 624-630.
- [14] 吕晓静, 李宁, 翁春生. 基于双光路吸收光谱技术的气液两相爆轰燃气诊断技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 582-586.  
Lü X J, Li N, Weng C S. Research on diagnosis of gas-liquid detonation exhaust based on double optical path absorption spectroscopy technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 582-586.
- [15] 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.
- [16] Rieker G B, Liu X, Li H, et al. Measurements of near-IR water vapor absorption at high pressure and temperature [J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(1): 169-178.
- [17] 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.
- [18] 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(3): 469-478.
- [19] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K. Large-modulation-depth 2f spectroscopy with diode lasers for rapid temperature and species measurements in gases with blended and broadened spectra[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6500-6509.
- [20] Liu J T C, Jeffries J B, Hanson R K. Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows[J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(3/4): 503-511.
- [21] Mattison D W, Oehlschlaeger M A, Morris C I, et al. Evaluation of pulse detonation engine modeling using laser-based temperature and OH concentration measurements [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2799-2807.
- [22] Mattison D W, Jeffries J B, Hanson R K, et al. In-cylinder gas temperature and water concentration measurements in HCCI engines using a multiplexed-wavelength diode-laser system: sensor development and initial demonstration[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 791-798.
- [23] Sanders S T, Mattison D W, Jeffries J B, et al. Rapid temperature tuning of a 1.4- $\mu\text{m}$  diode laser with application to high-pressure H<sub>2</sub>O absorption spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(20): 1568-1570.
- [24] 侯月, 黄克谨, 于冠一, 等. 基于红外 TDLAS 技术的高精度 CO<sub>2</sub> 同位素检测系统的研制[J]. *红外与激光工程*, 2021(4): 20200083.  
Hou Y, Huang K J, Yu G Y, et al. Development on high precision CO<sub>2</sub> isotope measurement system based on infrared TDLAS technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021(4): 20200083.
- [25] 王国水, 郭奥, 刘晓楠, 等. TDLAS 气体检测系统仿真与影响因素分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(10): 3262-3268.  
Wang G S, Guo A, Liu X N, et al. Simulation and influencing factors analysis of gas detection system based on TDLAS technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(10): 3262-3268.
- [26] 吕文静, 李红莲, 李文铎, 等. TDLAS 技术调制参量的优化及实验研究[J]. *激光技术*, 2021(3): 336-343.  
Lü W J, Li H L, Li W D, et al. Optimization and experimental research on modulation parameters of TDLAS technology[J]. *Laser Technology*, 2021(3): 336-343.
- [27] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: comparison of experiment and theory [J]. *Applied Physics B*, 1981, 26(3): 203-210.
- [28] Kang Y, Li N, Weng C S, et al. Acoustic characteristics of pulse detonation engine with ellipsoidal reflector[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(10): 104703.