

# 基于数字反馈稳频的激光瓦斯遥测技术

孙延光<sup>1,2</sup> 董作人<sup>1</sup> 陈迪俊<sup>1</sup> 叶青<sup>1</sup> 蔡海文<sup>1</sup> 瞿荣辉<sup>1</sup> 龚尚庆<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800  
<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup>山东华辰泰尔科技发展有限公司, 山东 济南 250101

**摘要** 研制了一套基于数字反馈稳频的便携式瓦斯浓度遥测装置, 采用电流和温度双重反馈稳频的策略抑制了激光器波长的长期漂移, 同时也保证了光功率的长期稳定性。实验结果表明, 9 h 内激光器波长的长期漂移小于 1.2 pm, 光功率保持稳定, 保证了瓦斯浓度的长期连续稳定的测量; 不同距离下浓度测量值重复性较好, 浓度波动小于 5%, 满足实际环境中(如天然气管道泄漏、煤矿等)瓦斯浓度测量需求。

**关键词** 激光技术; 谐波稳频; 波长调制光谱; 瓦斯遥测; 重复性

中图分类号 TN248.4; O433.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0408002

## Laser Methane Remote Sensing Technology Based on Digital Feedback Frequency Stabilization

Sun Yanguang<sup>1,2</sup> Dong Zuoren<sup>1</sup> Chen Dijun<sup>1</sup> Ye Qing<sup>1</sup> Cai Haiwen<sup>1</sup>  
Qu Ronghui<sup>1</sup> Gong Shangqing<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Shandong Huachentel Information Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China

**Abstract** A portable methane remote sensor based on digital feedback frequency stabilization is developed. Current and temperature dual-feedback strategy suppresses the laser's long-term wavelength drift; meanwhile it ensures the long-term stability of optical power. Experimental results show that the wavelength drift is less than 1.2 pm in 9 h, and the optical power also remains stable, which ensures the long-term continuous measurement stability of the concentration. Repeatability of concentration measurement value is stable in different detection distances, with a 5% fluctuation. Experimental results indicate that the instrument can be used in practical environment, such as natural gas tube leakage and coal mine.

**Key words** laser technique; harmonic frequency stabilization; wavelength modulated spectroscopy; methane remote sensing; repeatability

**OCIS codes** 140.3425; 120.0280; 280.3420; 300.6390; 280.4788

## 1 引 言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术具有高灵敏度、强选择性、快速等优点, 在痕量气体探

测、工业过程监测和控制、燃烧过程诊断和分析、气体光谱分析等领域有着广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。TDLAS 用于气体探测中最常用的调制技术就是波长调制光

收稿日期: 2012-11-07; 收到修改稿日期: 2012-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(61108028, 61178031)和山东信息通信技术研究院引进海内外高层次人才项目资助课题。

作者简介: 孙延光(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光电探测与激光器稳频技术等方面的研究。

E-mail: ygsun@siom.ac.cn

导师简介: 瞿荣辉(1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子器件与信息系统的研究。

E-mail: rhqu@siom.ac.cn

谱<sup>[5]</sup>(WMS)技术,当激光器波长对准待测气体的特征吸收峰中心时,激光器波长由于受到调制,经过气体吸收会产生调制频率的各次谐波。其中最常用的就是二次谐波探测技术<sup>[6]</sup>,利用吸收峰中心的二次谐波分量和一次谐波分量反演出待测气体浓度。但是半导体激光器的波长受到驱动电流和温控精度的影响,因此波长长期稳定性不佳,当激光器波长偏离气体的吸收峰中心时,会严重影响瓦斯气体浓度测量的准确性,实际中解决这一问题可以采用波长扫描或者稳频的方法。汪磊等<sup>[7]</sup>采用了周期性扫描激光器驱动电流的方式进行浓度的测量,但该方法扫描时间过长,测量效率低。Uehara等<sup>[8]</sup>采用频率调制光谱技术对半导体激光器进行温度反馈稳频,达到了较好的测量效果,但是该实施方案中由于调制频率较高,对于电子学系统设计要求较高,而且当测量距离变化3.5 m时,二次谐波信号会有90°相移,锁相放大器需要实时调整相位以解调出最大谐波信号,复杂度较高。王贵师等<sup>[9]</sup>利用Labview软件设计数字比例-积分-微分(PID)算法反馈控制半导体激光器的电流来提高激光器输出波长稳定性,但只进行电流补偿而没有温度补偿,长期的电流反馈补偿会影响激光器的直流偏置电流,直流光功率也受到影响,从而影响测量瓦斯浓度的重复性;同时,该测量技术需要用到工控机,从而不能够进行便携式测量。文献[10]同样采用基于Labview软件的方法将激光器波长锁定在甲烷的吸收峰上。

为了提高瓦斯浓度测量的长期稳定性,本文采用了电流和温度双重反馈稳频技术的瓦斯浓度测量方案,研制了一套用于瓦斯浓度测量的便携式激光瓦斯遥测装置。对半导体激光器进行电流反馈补偿的同时,又对温度进行反馈控制,抑制了半导体激光器长时间工作时的波长漂移和直流功率漂移,使得该装置能够长期连续、稳定测量,且测量重复性好、准确度高。实验装置采用数字PID算法对激光器电流和温度进行反馈稳频,采用另一套数字PID算法和脉冲宽度调制(PWM)技术进行温度反馈控制,9 h的波长漂移小于1.2 pm,满足长时间连续测量瓦斯浓度的要求,采用自制开关锁相解调电路模块进行谐波探测和解调,采用单片机进行信号处理、浓度计算以及系统的整体控制,系统的所有元器件均易于集成化,小型化和功低耗,而且可以采用单节锂电池进行供电,实现了便携式测量,可以方便地应用于天然气管道泄漏、煤矿瓦斯巡检等场合。

## 2 系统测量原理

### 2.1 测量原理

甲烷分子在近红外波段有很多特征吸收线<sup>[11]</sup>,综合考虑光源和吸收线强等因素,选择甲烷的2ν<sub>3</sub>带R3支作为探测吸收线,其精确的波长位于1653.72 nm处。

瓦斯浓度测量原理如图1所示,光机测量头发出的激光经过气体的来回两次吸收后,经漫反射体反射回来接收,根据Beer-Lambert吸收定律,可知经过气体吸收后探测的光功率为<sup>[12,13]</sup>

$$P_r = \eta K(R, A) P_{out} \exp[-D(\nu)] = \eta K(R, A) P_{out} \exp[-\alpha(\nu) \times 2C_R], \quad (1)$$

式中P<sub>r</sub>为接收光功率,η为漫反射率,K(R,A)为收集效率(无气体吸收和漫反射率为1时接收光功率与发射光功率之比,与探测距离R,接收透镜孔径A等因素有关),P<sub>out</sub>为发射光功率,D(ν)为光学深度,α(ν)为气体吸收系数,C<sub>R</sub>为气体路径积分浓度即体积分数与吸收长度的乘积。

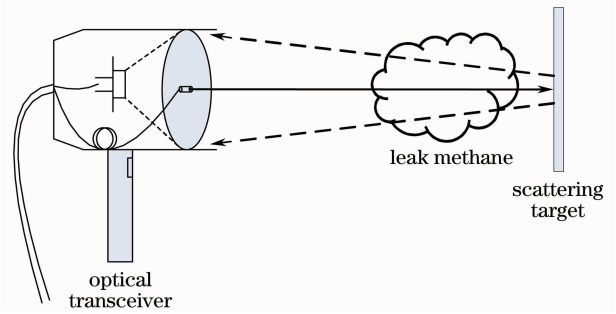


图1 瓦斯浓度测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of the concentration measurement

激光器波长被正弦调制,且对准吸收峰中心时,可以表示为

$$\nu = \nu_0 + \Delta\nu \cos(2\pi ft), \quad (2)$$

式中ν<sub>0</sub>为吸收峰的中心频率,Δν为频率调制幅度,f为调制频率,t为时间。

对应的光功率调制为

$$P_{out} = P_{DC} + P_{AC} \cos(2\pi ft) = P_{DC} [1 + m \cos(2\pi ft)], \quad (3)$$

式中m为交流调制功率P<sub>AC</sub>和直流功率P<sub>DC</sub>的比值。

小光学深度下,即D(ν)≪1时,(1)式的指数项可以取近似,调制的激光经过气体的吸收作用后,吸收谱中产生的各次谐波分量可以通过傅里叶分析得到,其中一次谐波和二次谐波分量及其比值可以表示为

$$P_{1f} = \eta K(R, A) P_{DC} m, \quad (4)$$

$$P_{2f} = \eta K(R, A) P_{DC} k_2 \alpha_0 \times 2C_R, \quad (5)$$

$$P_{2f}/P_{1f} = k_2 \alpha_0 \times 2C_R/m, \quad (6)$$

式中  $k_2$  为吸收系数  $\alpha(\nu)$  展开的二次谐波的傅里叶系数,与波长相对调制幅度有关,且存在一个使二次谐波达到最大的最优值,  $\alpha_0$  为吸收峰中心处的吸收系数。

因此,利用二次谐波和一次谐波的比值  $P_{2f}/P_{1f}$  就可以反演出待测瓦斯气体的路径积分浓度  $C_R$  并且比值法可消除距离、收集效率等因素的影响。

以上分析是基于激光器波长对准吸收峰中心时的结论,但是当波长发生漂移时,浓度测量就会受到影响;并且由(6)式可知,若功率的交流调制幅度不变,直流量发生漂移,相当于  $m$  发生了变化,那么比值法测量出的浓度值也会受到影响。下面就波长漂移对浓度影响进行仿真分析。

## 2.2 仿真分析

针对激光器波长漂移对浓度测量的影响,运用 Matlab 软件进行仿真分析,各仿真参数的选取与实际情况一样,结果如图 2 所示。

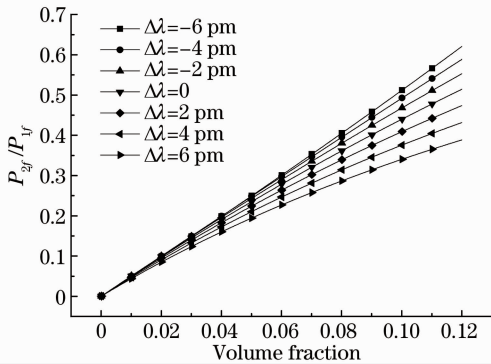


图 2 不同波长漂移下  $P_{2f}/P_{1f}$  比值随体积分数变化曲线

Fig. 2  $P_{2f}/P_{1f}$  versus volume fraction at different wavelength drifts

图 2 中横坐标为甲烷体积分数,纵坐标为二次谐波与一次谐波分量的比值,  $\Delta\lambda$  为激光器波长相对于甲烷吸收峰中心的漂移量,图 2 中仿真了波长漂移变化  $\pm 6$  pm 的 7 条曲线。计算结果表明,在甲烷体积分数为 10% 时,当波长偏离吸收峰中心 2 pm 时,  $P_{2f}/P_{1f}$  比值变化了约 7%,仿真分析中固定吸收长度为 10 cm,若吸收长度变大,则这个变化会更大,对波长稳定性要求更高。

基于以上仿真分析结果,可知为保证浓度测量的重复性和稳定性,当允许浓度测量误差在 10% 以内,测量范围小于 10% 的体积分数时,至少需要激光器波长稳定度优于 2 pm,同时直流光功率波动要

小于 10%。

## 3 实验装置与设计

### 3.1 实验装置

便携式激光瓦斯遥测装置的系统结构设计分为两部分,即光机收发测量头和电路控制箱,装置如图 3 所示,方框里面的即是电路控制箱,和手持式光机收发测量头通过波纹管(metal-bellow)连接起来。系统采用的光源为 14 脚蝶形封装的分布反馈式(DFB)激光器(Inphenix IPDFD1602),线宽小于 3 MHz,测量得到的电流波长调谐系数和温度波长调谐系数分别为 0.008 nm/mA 和 0.105 nm/K。实验中驱动电流的直流偏置和交流调制峰峰值分别为 38 mA 和 9 mA,对应的直流输出功率约为 1.4 mW,交流调制功率峰峰值为 0.45 mW,交流调制频率为 10 kHz,波长的相对调制幅度约为 1.8。单片机 1(MCU1)采用数字 PID 算法并产生占空比可变的 PWM 脉冲对 DFB 激光器进行温度反馈控制。激光器的出射光经 1:99 耦合器分束,小部分光进入吸收长度为 3 cm 的参考气体吸收池,参考吸收池充的是纯甲烷气体,然后经光电探测器(PD1)探测后锁相解调,得到误差信号用于反馈稳频。大部分光经安装在光机发射头部的光纤准直器准直后发射,出射激光的发散角为 2 mrad(对应 10 m 探测距离下光斑大小为 20 cm),探测光经充满一定流量配比的甲烷气体(缓冲气体为氮气,通过流量计可改变流量配比)的圆柱形待测气室后,被吸收的光经漫反射回来,实验中漫反射体采用红色的塑料泡沫,安放在密封气室里面,气室的吸收长度为 5 cm,为了防止标准具效应,气室入射窗口玻璃倾斜了 45°。回来的漫反射光经光机发射头部的菲涅耳透镜( $\Phi 10$  cm)聚焦到光电探测器(PD2)上,光电转换后的信号,经自制的开关锁相解调模块解调出一次谐波信号  $1f$  和二次谐波信号  $2f$ ,然后经模数转换芯片(ADC)采集,单片机 2(MCU2)进行数字信号处理,根据标定的拟合公式,反演出待测气体的浓度,测量结果显示在液晶显示模块(LCD)上。当然测量结果还可以通过数据传输接口实时传送到上位机进行监控分析。

### 3.2 反馈控制

MCU1 采用数字 PID 算法控制 PWM 脉冲占空比进行温度反馈控制,MCU2 采用数字 PID 算法控制驱动电流进行反馈稳频,以抑制 DFB 激光器的长期漂移。连续 PID 的基本控制算法公式为<sup>[14]</sup>

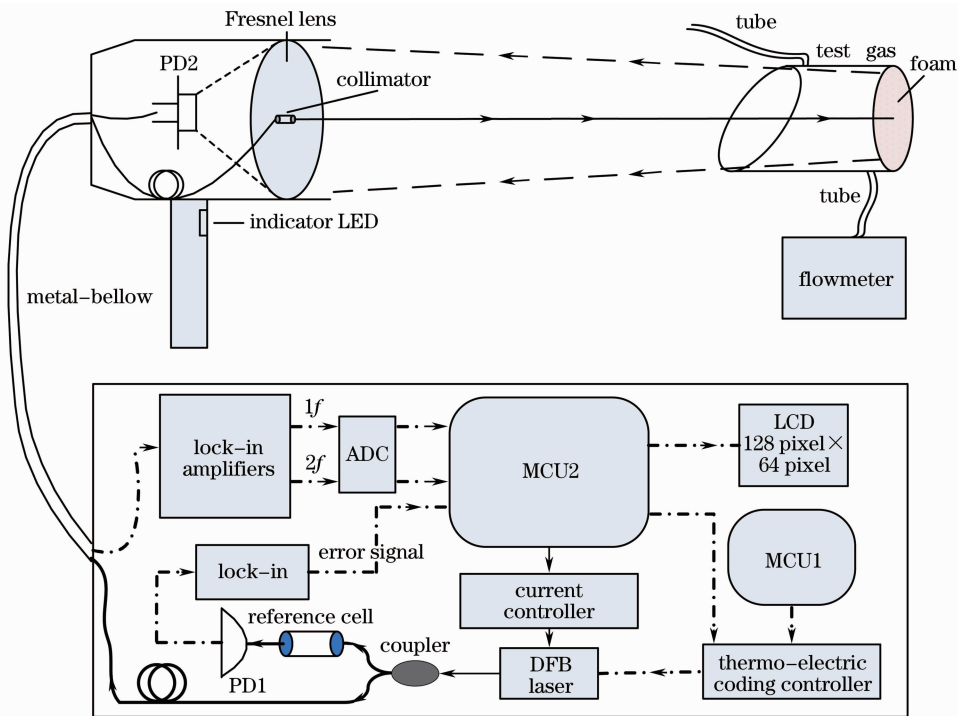


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the instrument

$$u(t) = K_P e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt, \quad (7)$$

式中  $u(t)$  为反馈控制量,  $e(t)$  为误差信号,  $K_P, T_D, T_I$  分别为比例系数、微分常数和积分常数。将连续 PID 算法公式离散化后有

$$u_k = K_P e_k + \frac{T_D}{T_S} (e_k - e_{k-1}) + \frac{T_S}{T_I} \sum_{j=0}^k e_j, \quad (8)$$

式中  $u_k$  为第  $k$  次反馈量,  $e_k$  为第  $k$  次的采样误差信号,  $T_S$  为采样周期。

MCU2 稳频 PID 所用采样周期(包括其他程序执行时间)  $T_S$  约为 100 ms, 使用凑试法调试后选取  $K_P = 1/11, T_D = 0, T_I = 1600$  ms, 系统可以很好地稳频。温度反馈的设定点为 35 °C 附近。当反馈控制电流超过设定阈值(1 mA)后, 按照温度波长系数, 调节温度设定点进行反馈控制。

反馈稳频的过程如下: 开启 DFB 激光器, 等待激光器温控稳定后, 单片机 2 扫描激光器的驱动电流并采集误差信号, 当扫描到参考气室中甲烷的多普勒吸收峰时, 单片机 2 开启数字 PID 反馈, 反馈量施加在 DFB 激光器的驱动电流上, 用于补偿短期较小的频率漂移。而当长时间连续测量时, 波长的漂移必然造成电流反馈补偿量很大, 这样就造成直流工作点的较大漂移, 而由于交流调制没有变化, 即此时  $m$  发生了变化, 由(6)式可知这会影响甲烷浓度测量的稳定性。因此系统判断当反馈电流超出一定范围时就给温度设定点施加一个反馈量, 靠温度来补偿长期较大的波长漂移, 从而抑制了激光器直流工作点的漂移, 进而保证了浓度测量的稳定性。反馈稳频的流程图如图 4 所示。



图 4 反馈稳频的流程图

Fig. 4 Flow chart of the feedback stabilization

## 4 结果与分析

为了验证 DFB 激光器的稳频效果, 对激光器的波长稳定性进行了长期测试。采用测量精度为  $0.2 \times 10^{-6}$  (对于测量波长为 1653.7 nm, 对应的精度为

0.33 pm) 的波长计 (Bristol, 721A laser spectral analyzer) 对 DFB 激光器的波长进行监测并记录数据, 结果如图 5 所示。图 5(a) 所示为 DFB 激光器不稳频时约 2 h 的波长漂移情况。由图 5(a) 可知 2 h 内激光

器波长漂移较大,最大漂移为 8 pm,显然,会对甲烷浓度测量造成较大影响。图 5(b)所示为 DFB 激光器采用稳频技术时 9 h 的波长漂移情况。由图 5(b)可知,9 h 内激光器的波长漂移小于 1.2 pm,激光器的波长漂移得了很好的抑制,由前面的分析可知这不会对甲烷浓度测量造成明显影响。

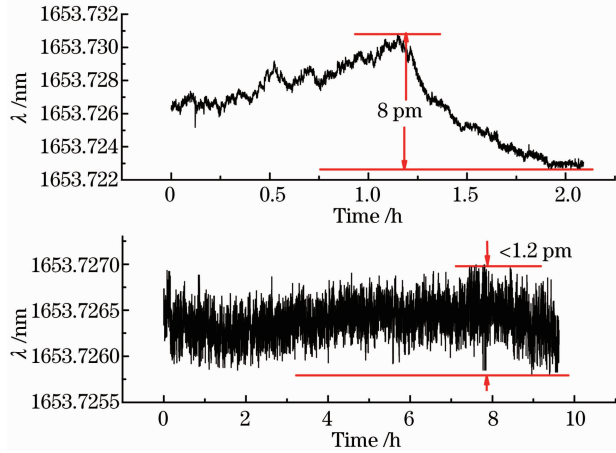


图 5 DFB 激光器的频率稳定性。(a)不稳频时 2 h 的波长漂移;(b)稳频时 9 h 的波长漂移

Fig. 5 Frequency stability of the DFB laser. (a) Wavelength drift in 2 h without stabilization; (b) wavelength drift in 9 h with stabilization

为了验证 DFB 激光器在稳频和不稳频情况下对浓度测量重复性的影响,进行如下实验:固定光机收发测量头部和待测气室的距离不变,分别使激光器处于稳频和非稳频状态,改变流量计的甲烷和氮气的流量配比,对甲烷浓度测量值(实际测量的是  $2f$  和  $1f$  的功率比值,没有拟合)进行两个回合的标定。标定结果如图 6 所示。图 6(a)所示为 DFB 激光器在不稳频状态下,调节流量计的甲烷和氮气配比,甲烷的体积分数依次为 8%,5%,2%,1%,5%,2%,1%,0 等 8 种情况下的重复性标定结果,总用时 170 min。由图 6(a)可知两个回合下,每个浓度对应的比值波动很大,有的浓度对应的比值会朝一个方向漂移;而且同样的浓度下,前后对应的比值重复性不好。图 6(b)所示为 DFB 激光器在稳频状态下,调节流量计的甲烷和氮气配比,甲烷的体积分数依次为 0,8%,5%,2%,1%,5%,2%,1% 等 8 种情况下的重复性标定结果,总用时 210 min。由图 6(b)可知两个回合下,每个浓度下对应的比值波动大大减小,漂移并不明显;而且同样的浓度下,前后两次对应的比值基本稳定不变。由此 DFB 激光器的稳频对于甲烷浓度长期连续稳定的测量有重要影响。

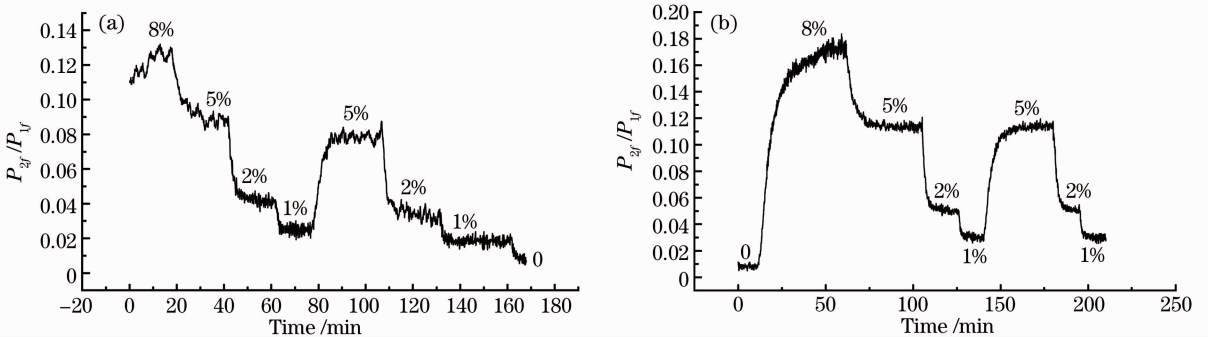


图 6 浓度重复性测量结果。(a)激光器不稳频;(b)激光器稳频

Fig. 6 Measuring results of concentration's repeatability. (a) Without stabilization; (b) with stabilization

作为测量瓦斯浓度的仪器,必须保证在不同的探测距离下同一浓度测量值的一致性。进行了如下对比试验:考虑到激光器出射功率的限制,分别在探测距离为 1.6 m 和 2.7 m 情况下,对甲烷浓度测量值(实际测量的是  $2f$  和  $1f$  的功率比值,没有拟合)进行两个回合的标定,结果如图 7 所示。图 7(a)所示为探测距离为 1.6 m 情况下的浓度标定结果,除去本底浓度(不通甲烷气体时的比值 0.0083)后,甲烷体积分数分别为 8%,5%,2%,1% 下对应的比值分别为 0.1631~0.1653,0.1046~0.1058,0.0412~0.0418,

0.0217~0.0221。单一浓度的测量值均方根误差小于 5%。图 7(b)所示为探测距离为 2.7 m 情况下浓度标定结果,除去本底浓度(不通甲烷气体时的比值 0.0178)后,甲烷体积分数分别为 8%,5%,2%,1% 下对应的比值分别为 0.1636~0.1657,0.1049~0.1070,0.0421~0.0433,0.0196~0.0206,单一浓度的测量值均方根误差小于 5%。图 7(c)所示为距离为 1.6 m 和 2.7 m 情况下,1%,2%,5%,8% 浓度下的比值及标准差对比图。由图 7(c)可知,1.6 m 和 2.7 m 距离下,同一瓦斯浓度的测量值除了在浓

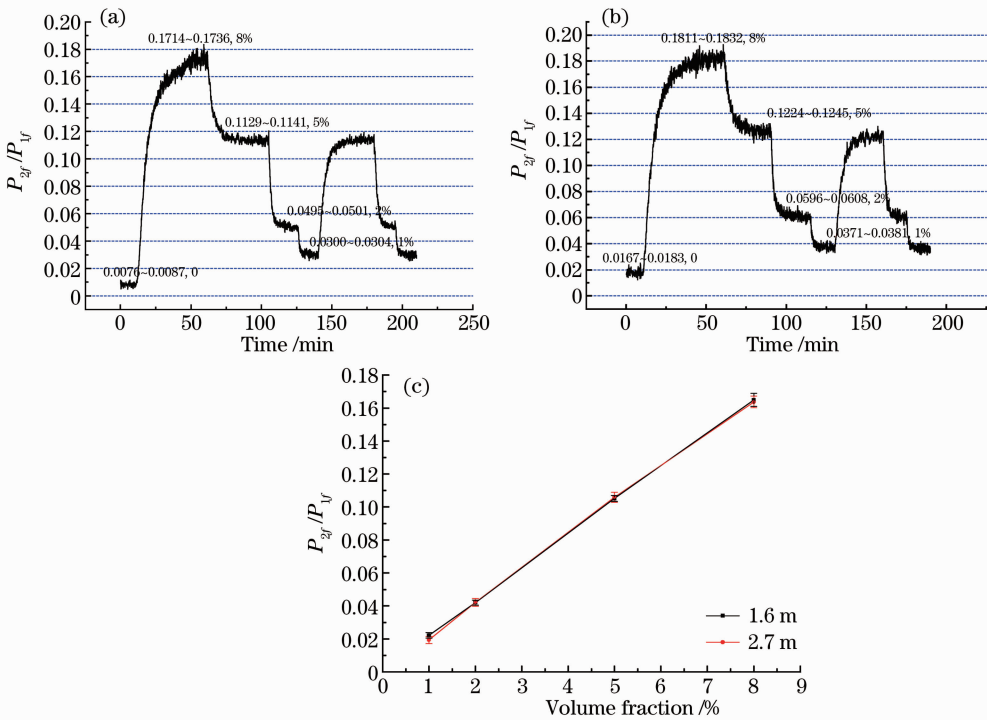


图 7 不同距离下瓦斯浓度测量结果。(a)1.6 m; (b) 2.7 m; (c)浓度标定结果对比

Fig. 7 Measuring results in different distances. (a) 1.6 m; (b) 2.7 m; (c) comparison at different distances

度较小和浓度较大时有一定差别外,中间范围内差别并不大,可见瓦斯浓度测量值受距离影响不大。

系统的最低可探测光功率可以从解调出的  $2f$  信号来计算得到,当没有气体吸收时,解调出  $2f$  信号的本底噪声就决定了系统的最低可探测  $2f$  光功率,从而决定了系统的最低可分辨浓度。实验中 1.6 m 距离下  $1f, 2f$  信号大小如图 8 所示。

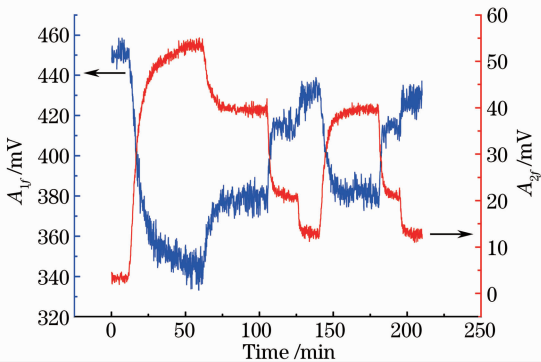


图 8 1.6 m 距离解调出的  $1f, 2f$  信号大小

Fig. 8 Amplitude of  $1f$  and  $2f$  signals at 1.6 m distance

图 8 左边纵轴为接收光功率中解调出的  $1f$  信号,右边纵轴对应解调出的  $2f$  信号。由图 8 可知,系统可探测的  $2f$  信号本底噪声(对应无气体吸收)为 3 mV,考虑系统的电路放大倍数及光电探测器转换效率等因素,经计算对应最低可探测光功率约为 0.3 nW,这也决定了系统的最大可探测距离。

## 5 结 论

基于数字反馈激光器稳频技术,研制了一套便携式激光瓦斯遥测装置,采用激光器电流和温度双重反馈的稳频策略,在抑制激光器波长期漂移的同时,也保证了直流光功率不会有较大的漂移。实验结果表明,9 h 内波长漂移小于 1.2 pm,满足长期连续稳定测量的要求;不同距离下,浓度标定的重复性较好,同一浓度的测量值均方根误差小于 5%,满足测量需求。由于所用激光器出射光功率的限制,并没有进行更长距离的测量实验。该装置使用的元器件成本低,易于实现集成化和小型化,功耗低,可以用于天然气管道泄漏检测以及煤矿瓦斯便携式巡检。

## 参 考 文 献

- 1 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 67~70
- 2 阙瑞峰, 刘文清, 张玉钧 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 67~70
- 3 W. Johnstone, A. J. McGettrick, K. Duffin *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy for industrial process applications: system characterization in conventional and new approaches[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1079~1088
- 4 L. C. Philippe, R. K. Hanson. Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30): 6090~6103

- 4 K. Duffin, A. J. McGettrick, W. Johnstone *et al.*. Tunable diode-laser spectroscopy with wavelength modulation: a calibration-free approach to the recovery of absolute gas absorption line shapes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(10): 3114~3125
- 5 P. Kluczynski, J. Gustafsson, Å. M. Lindberg *et al.*. Wavelength modulated absorption spectrometry—an extensive scrutiny of the generation of signals[J]. *Spectrochim. Acta Part B*, 2001, **56**(8): 1277~1354
- 6 J. Reid, D. Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode lasers—comparison of experiment and theory[J]. *Appl. Phys. B*, 1981, **26**(3): 203~210
- 7 Wang Lei, Tan Tu, Wang Guishi *et al.*. Natural gas pipeline leak detection system for laser remote sensing and calibration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2912~2917  
汪磊, 谈图, 王贵师等. 天然气管道泄漏激光遥感探测系统的研制及标定方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2912~2917
- 8 K. Uehara, H. Tai. Remote detection of methane with a 1.66  $\mu\text{m}$  diode laser[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(6): 809~814
- 9 Wang Guishi, Cai Tingdong, Wang Lei *et al.*. Application of digital frequency locking techniques in real-time measurement of methane in atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008002  
王贵师, 蔡廷栋, 汪磊等. 基于数字频率锁定技术实时探测实际大气中甲烷浓度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008002
- 10 Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao *et al.*. Frequency stabilization of an external cavity diode laser based on LabVIEW [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(3): 255~258  
董磊, 马维光, 尹王保等. 基于 LabVIEW 的外腔二极管激光器稳频实验[J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(3): 255~258
- 11 J. S. Margolis. Measured line positions and strengths of methane between 5500 and 6180  $\text{cm}^{-1}$  [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(19): 4038~4050
- 12 T. Iseki, H. Tai, K. Kimura. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**(6): 594~602
- 13 T. Iseki. Calculation of the ratio between the second and first harmonic signals in wavelength-modulation spectroscopy for absorption measurement [J]. *Opt. Rev.*, 2003, **10**(1): 24~30
- 14 He Zhigang, Deng Lunhua, Wang Guishi *et al.*. Nd:YAG laser frequency stabilization technology based on digital feedback control [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702009  
贺志刚, 邓伦华, 王贵师等. 基于数字反馈控制的 Nd:YAG 激光器频率稳定技术 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702009

栏目编辑:何卓铭