

文章编号: 0253-2239(2010)05-1261-07

棱镜气室在光纤甲烷检测系统中的应用研究

吴希军¹ 王玉田¹ 刘学才¹ 武静涛²

(¹ 燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

² 秦云科联环境工程有限公司, 河北 秦皇岛 066001

摘要 棱镜气室相较于传统渐变折射率透镜(GRIN)气室在灵敏度调节性及抑制干涉噪声方面优势明显。基于比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律在气体弱吸收时的近似表述,以大气环境为背景,利用背景扣除和谐波检测技术,实现了常压下甲烷不同体积分数水平(0~20%)的检测。依据实测的甲烷在不同体积分数时的直接吸收谱,结合现有分布反馈式激光二极管(DFB-LD)光源选择 $2\nu_3$ 带的R5支(1648.212 nm)作为被测吸收峰。气体配置过程中的在线实验表明系统示值与体积分数变化间线性关系良好,而且系统的稳定性和动态响应特性理想。该系统可根据不同现场环境的甲烷体积分数水平,通过步进电机调节气室内有效吸收光程,动态调整系统灵敏度,可作为煤矿巷道或天然气管道沿线的瓦斯监测仪器。

关键词 光纤光学;甲烷检测系统;可调谐激光吸收光谱;谐波检测;棱镜气室

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1261

Application Research of Prism Gas Cell in Fiber Optic Methane Sensing System

Wu Xijun¹ Wang Yutian¹ Liu Xuecai¹ Wu Jingtao²

¹ Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

² Chain Environment Engineering Corp, Qinhuangdao, Hebei 066001, China

Abstract Compared with gradient index (GRIN) gas cell, the sensitivity of prism gas cell is easy to be adjusted and the interference noise is apt to be suppressed. Based on the Beer-Lambert law, detection of various volume fraction (0~20%) of methane is completed by subtraction of background and harmonic detection method, as the atmosphere surroundings is treated as background. The direct absorption spectra of various volume fraction are measured using GRIN gas cell, combined with available distributed feedback laser diode (DFB-LD), where the R5 line of the $2\nu_3$ band of methane is selected as absorption peak. The system is tested online during gas mixing process and the linear relation between system indication and volume fraction variation is validated, also the stability and dynamic response characteristics is confirmed by experiments. The system sensitivity can be adjusted according to volume fraction level of various field environments by changing the prism distance and using step motor. The system can be applied to various fields and can be adopted as monitoring instrument for coal mine tunnel and natural gas pipeline.

Key words fiber optics; methane detection system; tunable laser absorption spectroscopy; harmonic detection; prism gas cell

1 引言

甲烷是矿井瓦斯和多种液体燃料的主要成分,

也是造成温室效应的主要气体。因此对甲烷体积分数进行准确、快速实时监测在矿业生产和环境监测

收稿日期: 2009-05-22; 收到修改稿日期: 2009-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(60672015)和高等学校博士点基金(20050216006)资助课题。

作者简介: 吴希军(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤气体传感方面的研究。E-mail: wuxijun@ysu.edu.cn

导师简介: 王玉田(1952—),男,博士,教授,主要从事光纤传感与测试系统等方面的研究。E-mail: y.t.wang@163.com

中具有重要作用。结合长距离光纤传感与红外谱吸收技术对甲烷进行稳定、精确的测量成为目前国内外研究的主流^[1~3]。其中,气室的设计和选择直接影响整个传感系统的性能和应用。在可调谐二极管激光吸收谱分析(TDLAS)系统中,应用较多的是 Herriott 型、White 型和渐变折射率透镜(GRIN)型气室。前两种气室作为光学长程池在大气监测中得到了广泛应用^[4~6],其中 Herriott 型气室由两个球面镜组成,结构简单易于准直,光路折返次数取决于镜面间距,在使用过程中不易调节;而 White 型气室由至少三块球面镜组成,结构相对复杂,但在使用过程中可通过调节球面镜来调整光程。GRIN 气室由一对带尾纤的 GRIN 透镜光纤组成,作为微型光学气室,在分布式光纤传感中得到了普遍应用^[7~9]。

由全反棱镜构成的气室与上述三种气室相比,在光路准直和灵敏度的调节能力上具有显著优势,可显著提高气室工作稳定性和检测灵敏度,已被越来越多研究人员所采用^[10~12]。

本文利用弱信号谐波检测技术及灵敏度可调的棱镜气室实现模拟煤矿环境下的甲烷体积分数检测。通过对分布反馈式激光二极管(DFB-LD)光源进行双频(锯齿与正弦)调制,检测经气室吸收后的一次和二次谐波信号,由其比值反映气体的体积分数变化情况。实验证实了系统示值与体积分数变化间的线性关系,而且系统的稳定性和动态响应特性比较理想,表明利用棱镜气室和谐波检测技术能够实现宽广体积分数范围内甲烷的高灵敏度检测。

2 测量原理

2.1 棱镜气室传感机理

基于全反棱镜的吸收室结构原理图如图 1 所示,由全反棱镜 D_1, D_2 的两个底面相对放置构成气室。探测光束由输入光纤经 GRIN 透镜准直后入射到棱镜 D_1 ,在 D_1, D_2 间往返奇数次后由透镜会聚到输出光纤输出。

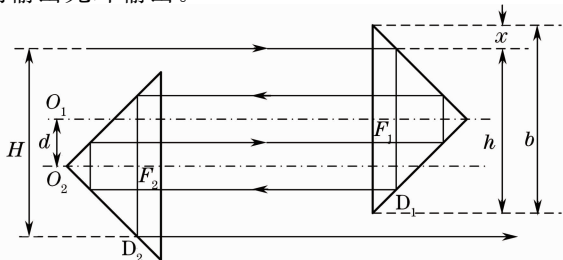


图 1 棱镜气室结构图

Fig. 1 Construction schematic of prism gas cell

输出光束与入射光束间距 H 为

$$H = 2 \sum_{i=0}^{N-2} (-1)^i \left(\frac{b}{2} - x - id \right), \quad (1)$$

式中 x 为入射光束与棱镜 D_1 顶部 45° 角棱边的距离, b 为棱镜底边长度, d 为间距, $0 < d < b - x$, N 为大于等于 3 的奇数。

光束在气室内往返次数 N 为

$$N = \text{int}(h/d) + 2, \quad (2)$$

式中 $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数, h 为入射光束到棱镜 D_1 底部 45° 角棱边的距离。调节 d , 即可调节探测光束在气室内往返的次数 N , 而且动镜 D_2 的位置调节精度或重复性对折返次数 N 无影响。在比尔-朗伯定律(Beer-Lambert)的线性近似下, 折返次数 N 可根据被测气体的吸收系数 α 和被测环境体积分数水平 c (体积分数) 来选择, 须满足 $N\alpha l_0 c \ll 1$ 的条件。

记图 1 中所示方向传播的光束为前向光束, 前向光束在界面 F 处会有部分光能发生反射, 因前向光束传播方向与界面近似垂直, 反射光很微弱(反射率 $r \approx 0.04$), 因此, 在计算气室出射光强时, 除前向光强外, 仍须考虑发生在单个棱镜内部由界面 F 引入的二次反射光强和发生在两棱镜间由界面 F 引入的二次反射光强的情况, 则气室出射光强度

$$I(\lambda) = I_f(\lambda) + I_r(\lambda), \quad (3)$$

式中 $I_f(\lambda)$ 为前向光强, $I_r(\lambda)$ 为界面二次反射总光强。

前向光强

$$I_f(\lambda) = I_0(\lambda) \tau^{2N-2} \exp[-N\alpha(\lambda)cl_0], \quad (4)$$

式中 τ 为棱镜底面透射率, l_0 为棱镜两底面间距, 即气室长度。

反射光强

$$I_r(\lambda) = I_0(\lambda) \tau^{2N-2} \exp[-N\alpha(\lambda)cl_0] \{ (N-1)r^2 + (N-2)r^2 \exp[-2\alpha(\lambda)cl_0] \}, \quad (5)$$

式中 r 为棱镜底面反射率, 大括号中两项分别代表由界面(F_1, F_2) 出射光线(在棱镜内反射两次)的条数 $(N-1)$ 和从界面入射光线(在气室内反射两次)的条数 $(N-2)$ 。

将(4),(5)式代入(3)式, 整理得

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \tau^{2N-2} \exp[-N\alpha(\lambda)cl_0] \cdot \{ 1 + (N-1)r^2 \{ 1 + \exp[-2k(\lambda)l_0] \} \}, \quad (6)$$

式中 $k(\lambda)l_0 = \frac{1}{2} \ln \frac{N-1}{N-2} + \alpha(\lambda)cl_0$ 。

令其中一个直角棱镜略微倾斜, 使得前向光束与反射光束分离, 则气室出射光强

$$I(\lambda) \approx I_f(\lambda) = I_0(\lambda) \tau^{2N-2} \exp[-N\alpha(\lambda)cl_0]. \quad (7)$$

气室出射光束经透镜聚焦后,用 GRIN 光纤接收并传输到光电探测器,有效抑制了旁轴(反射)光束的干扰。棱镜间的相对微小平移(Δd)或(绕棱)偏转导致输出光束位置的变化,进而影响输出光束与光接收器件间的耦合。采用长焦距透镜可使输出光束光轴在接收光纤端面上入射角近似相等,提高系统稳定性。

2.2 吸收谱分析及谐波检测

甲烷分子的四个本征振动波长分别为 3.433, 6.522, 3.312 和 7.658 μm 。甲烷在 3~4 μm 波段区域有强烈的振动吸收峰,虽然铅盐激光器可以产生这一波段的光,但光源和探测器都需要低温制冷,使用不便。另外,在这一波段红外光纤技术不成熟,处于石英光纤的高衰减区,因此甲烷在此波段的吸收不适于光纤传感。在近红外区,甲烷有许多泛频和组合吸收带。其中较强的吸收带为泛频带($2\nu_3$)和组合带($\nu_2+2\nu_3$),分别位于 1.6 μm 和 1.3 μm 附近。在石英光纤的低损耗区(1.0~1.7 μm),光源技术和光电转换技术相对成熟,因此选择近红外波段的吸收是目前技术条件下的最好选择。图 2 给出 HITRAN 2004 数据库中常温(23 $^\circ\text{C}$)下甲烷在泛频带($2\nu_3$)波段的吸收线强图。

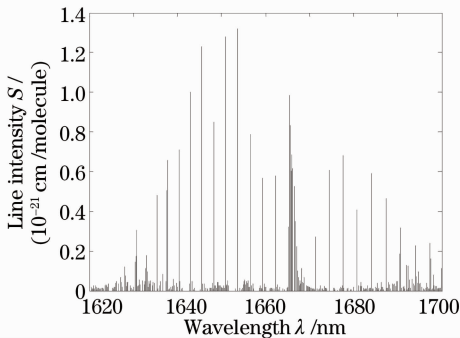


图 2 $2\nu_3$ 泛频带甲烷吸收谱线图

Fig. 2 Line positions and strengths of the $2\nu_3$ band of CH_4

图 3 为利用 5 cm GRIN 气室、SLD 光源及 ANDO AQ6317C 光谱仪实验测得的甲烷在 1.6 μm 波段扣除背景后直接吸收谱线。

Beer-Lambert 定律可表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\exp(-\alpha_\lambda Lc), \quad (8)$$

式中 α_λ 为吸收系数(cm^{-1}), c 为体积分数, L 为气体吸收光程(cm)。

吸收率 $\alpha_\lambda c$ 可表示为

$$\alpha_\lambda c = MS(T)g(\nu - \nu_0)P, \quad (9)$$

式中 M 为分子数浓度(cm^{-3}), S 为吸收线强

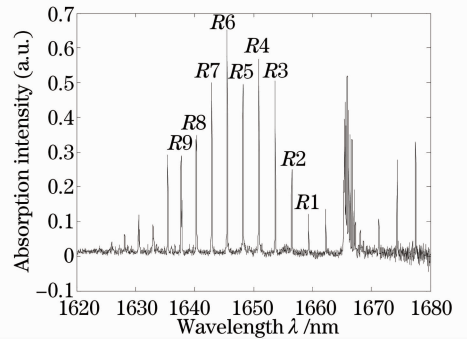


图 3 实测 1.6 μm 直接吸收谱线图

Fig. 3 Measurement direct absorption spectra around 1.6 μm

($\text{cm} / \text{molecule}$), g 为归一化线型函数(cm), P 为气室内压强^[13]。

常压下气体吸收线型可用洛伦兹函数来表示,由 HITRAN 数据库查得甲烷在 1648.212 nm 波长附近有四条强吸收线,分布在 0.02 nm 波长范围内,可等效为一条吸收线,其吸收线半峰全宽约为 0.141 cm^{-1} (0.038 nm),线强 S 约为 $3.07 \times 10^{-21} \text{ cm} / \text{molecule}$,据此绘出甲烷在常压下归一化洛伦兹吸收线型,如图 4 所示。

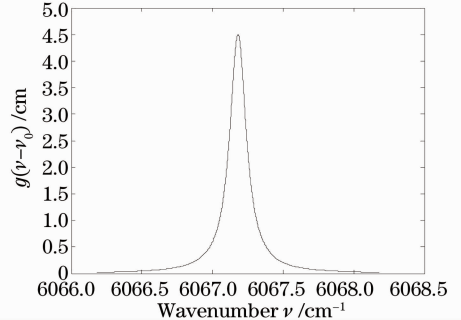


图 4 归一化气体吸收线型

Fig. 4 Normalized gas absorption line profile

结合图 4 和等效吸收线强值,由(9)式可计算出在不同体积分数水平下甲烷单位长度气体吸收率,如图 5 所示。据此可确定不同体积分数下气室内有

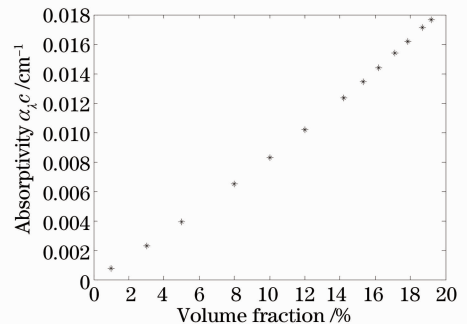


图 5 不同体积分数下甲烷吸收率

Fig. 5 Absorptivity of various volume fraction of CH_4

效吸收光程的可选范围。

谐波检测,通过对光源注入电流进行正弦调制,检测经气体吸收后产生的与体积分数相关的接收光信号的谐波分量。根据 Beer-Lambert 定律,光源经调制后,接收光信号可表示为

$$I(\lambda) = I_0(1 + m \sin \omega t) \exp(-\alpha_\lambda Lc) \approx I_0(1 + m \sin \omega t)(1 - \alpha_\lambda Lc) \quad |_{\alpha_\lambda Lc \ll 1}, \quad (10)$$

式中 I_0 为直流偏置光强, $I(\lambda)$ 为气体吸收后的透射光强, ω 为调制角频率, m 为强度调制系数, 约为 $0.002^{[14]}$ 。忽略高阶小项 $m \sin \omega t \cdot \alpha_\lambda Lc$, 则(10)式可化简为

$$I(\lambda) = I_0(1 + m \sin \omega t - \alpha_\lambda Lc). \quad (11)$$

光源经调制后输出波长可表示为

$$\lambda = \lambda_{0S} + nmI_0 \sin \omega t, \quad (12)$$

式中 λ_{0S} 为光源静态工作点时波长, $n = s\beta$ (s 为电调率, β 为注入电流强度与光强之间的比例系数)。

不计空气中微量甲烷, 则气室内混合气体中甲烷体积分数为

$$c = \frac{V_c}{V_c + V_a} \times 99.9\%, \quad (13)$$

式中 V_c, V_a 分别为注入气室的高纯甲烷和洁净空气在一个大气压下的体积数(单位 L), 高纯甲烷体积分数为 99.9%。控制注入气室的甲烷和空气的体积数可配制出不同体积分数的混合气体。

折算出分子数深度 M 为

$$M = \frac{0.001 \times V_c}{22.4 \times (V_c + V_a)} \times N_A, \quad (14)$$

式中 N_A 为阿伏加德罗常数, 数值为 $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 。

由(9)式可知, 吸收系数

$$\alpha_\lambda = \frac{M}{c} S(T) g(\nu - \nu_0) P, \quad (15)$$

式中 $M/c \approx 2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 归一化线性函数 $g(\nu - \nu_0)$ 可表示为

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu_L}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_L/2)^2}. \quad (16)$$

令 $\gamma_L = \Delta\nu_L/2$ 表示吸收线半峰全宽, 则(16)式可化简为

$$g(\nu) = \frac{1}{\pi\gamma_L} \frac{1}{[(\nu - \nu_0)/\gamma_L]^2 + 1}, \quad (17)$$

将(17)式代入(15)式得吸收系数

$$\alpha_\lambda = \frac{\alpha_0}{[(\nu - \nu_0)/\gamma_L]^2 + 1}, \quad (18)$$

式中 $\alpha_0 = SP(M/c)(1/\pi\gamma_L) \approx 0.19 \text{ cm}^{-1}$, 在一定温度和压强下为常数。由波数 ν 与波长 λ 的公式 $\nu =$

$10^7/\lambda$, 可得出吸收系数 α_λ 以 λ 为参量的关系式:

$$\alpha_\lambda = \frac{\alpha_0}{[(\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda]^2 + 1}, \quad (19)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为吸收峰的半峰全宽。

将(19)式, (12)式代入(11)式得

$$I(\lambda) = I_0 \left\{ 1 + m \sin \omega t - \frac{\alpha_0 c L}{1 + [(\Delta\lambda_0 + nmI_0 \sin \omega t)/\Delta\lambda]^2} \right\}, \quad (20)$$

式中 $\Delta\lambda_0$ 为光源中心波长与气体吸收中心波长差, $\Delta\lambda_0 = \lambda_{0S} - \lambda_0$, 当光源的中心波长 λ_{0S} 接近于气体吸收峰 λ_0 , 调制信号加在气体吸收峰上时, $\Delta\lambda_0 \approx 0$ 。定义 $x = nmI_0/\Delta\lambda$, 将(20)式傅里叶级数展开, 其一次谐波(f)和二次谐波($2f$)系数分别为

$$I_f = mI_0, \quad (21)$$

$$I_{2f} = -k\alpha_0 c L I_0. \quad (22)$$

利用锁相放大器分别检测调制频率的一次和二次谐波分量, 一次谐波分量主要由强度调制引起, 其幅度大小正比于光源的平均功率。(22)式中^[15]

$$k = \frac{2[2 + x^2 - 2(1 + x^2)^{1/2}]}{x^2(1 + x^2)^{1/2}}, \quad (23)$$

k 为 x 的函数, 当二次谐波取最大值时, $dk/dx = 0$, 得

$$x = (2 + 2\sqrt{2})^{1/2} \approx 2.2, \quad (24)$$

此时 $k = 0.343$ 。

将(22)式与(21)式两侧相除, 得

$$\frac{I_{2f}}{I_f} = -\frac{k}{m} \alpha_0 c L. \quad (25)$$

由(25)式可知, 二次谐波和一次谐波的比值不含有 I_0 项, 用其作为系统的输出可以消除光强波动等因素带来的干扰, 提高检测精度。因此, 棱镜气室在实际应用中, 棱镜底面的轻微污染虽会降低底面透射率 τ , 进而影响输出光强 I_0 , 但并不会对谐波(比值)检测的结果造成影响, 即只要两直角棱镜底面污染程度近似相同且可视均为均匀时, 可不考虑环境对直角棱镜底面污染对测量的影响。

综合谐波检测与多次反射棱镜气室可有效提高甲烷体积分数检测水平, 并且通过调整棱镜内折返次数 N , 可使系统应用于多种不同体积分数水平的环境测量中。

3 实验研究

设计的可变灵敏度的棱镜气室结构如图 6 所示, 气室壁由不锈钢材料制成。光学棱镜 D_1 固定

在气室壁上，而棱镜 D_2 可在螺杆的带动下相对于 D_1 移动，从而改变光路在气室内折返次数 N 。实验中选择棱镜底边长为 40 mm，气室直径 80 mm，为保证实验气室的良好密闭性(防止气体从螺杆空隙处逸出)，在气室内加装了两块红外石英窗，窗口间距 80 mm，即为气室有效长度 l_0 ，为降低窗口引入的反射损耗，在窗口两表面镀有增透膜。选用二相混合式步进电机和滚珠螺杆机构实现棱镜间的相对平移。步进电机步距角 0.9° ，螺杆导程 4 mm，最

大行程 60 mm，在控制器 600 p/s(每秒脉冲数)的方波脉冲驱动下，棱镜移动速度可达 6 mm/s。重复定位精度小于 $10 \mu\text{m}$ 。

实验中，调节间距 d 使光束在气室内折返 3 次，有效光程 24 cm。在实际应用中，为减轻煤尘、水气对气室内光学器件表面的污染，应在进气、出气口处加装除尘、除湿过滤网，而实验气室内用到的红外石英窗则可省却，此时气室有效长度 l_0 为两棱镜底面间的距离。

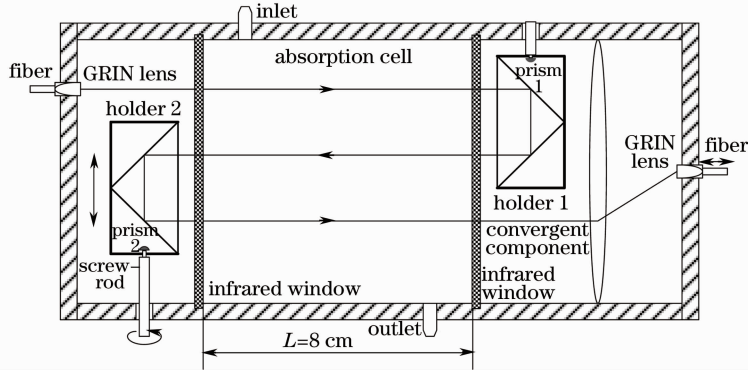


图 6 棱镜气室原理图

Fig. 6 Schematic of prism gas cell

系统整体结构如图 7 所示，选用的 DFB-LD 中心波长为 1647.386 nm，邻近甲烷 R5 支吸收线(1648.212 nm)。激光器温度调谐率接近 $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ，电流调谐率约为 $0.08 \text{ nm}/\text{mA}$ 。通过温度控制电路调整激光器工作温度，使其激光中心波长达到 1648 nm。由电流控制电路施加幅度为 5 mA，频率为 20 Hz 的慢变锯齿波信号和幅度为 1 mA，频率为 1 kHz 的正弦调制信号，使激光器中心波长扫描通过 R5 气体吸收峰。由 InGaAs PD 接收经气室吸收后的光信号，送入 SR830 数字锁相放大器检测其一次和二次谐波幅值(参考频率 1 kHz，由信号发生器提供，时间常数为 30 ms)，由数据采

集卡采集(采集速率 8000 点/s)后送入计算机进行背景扣除、累加平均(20 次)、比值处理并显示，数据采集的同步触发信号是由信号发生电路产生的与锯齿扫描信号同步的脉冲触发信号。在对气室充(甲烷)气实验之前，以大气环境为背景，测量气室背景信号。利用针阀控制注入气室的高纯(体积分数 99.9%)甲烷体积，充气过程中在不同体积分数水平下间歇性地进行测量。

图 8 为不同体积分数下采集到的二次谐波信号，其背景源自光电探测器的噪声和激光器的强度调制噪声。

图 9 为数据处理后绘出的谐波幅值比与体积分

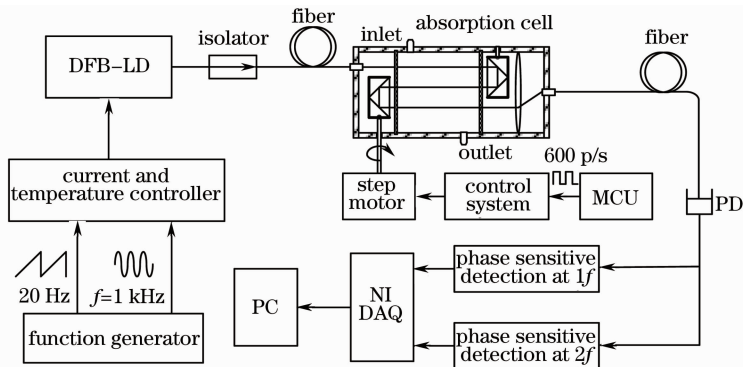


图 7 实验系统图

Fig. 7 Schematic of the experimental system

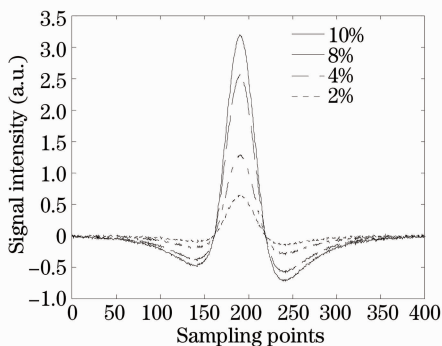
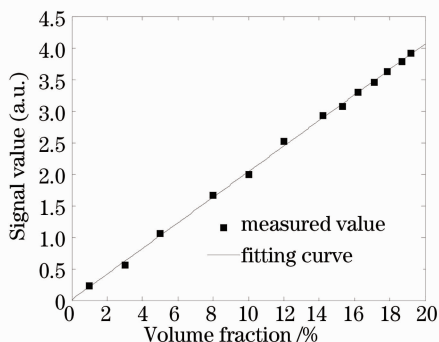
图 8 不同体积分数下的 $2f$ 信号谱Fig. 8 $2f$ signal spectra of different volume fraction

图 9 测量结果及拟合曲线

Fig. 9 Measurement result and fitting curve

数变化的关系曲线,可见,在体积分数较大的变化范围内,信号值(扣除背景之后)与体积分数呈良好线性关系。

在体积分数为 5% 时,进行系统的稳定性实验,测试结果如图 10 所示,数据标准偏差约为 5×10^{-4} 。以 3 倍标准偏差代入图 9 拟合直线方程,估计系统体积分数检测限约为 1.5×10^{-5} (即 0.0015%)。用洁净空气冲洗气室后测试系统动态响应特性,由针筒逐次注入一定体积的甲烷或空气,测试结果如图 11 所示,可见,在气体注入瞬间,测试信号存在波动,但很

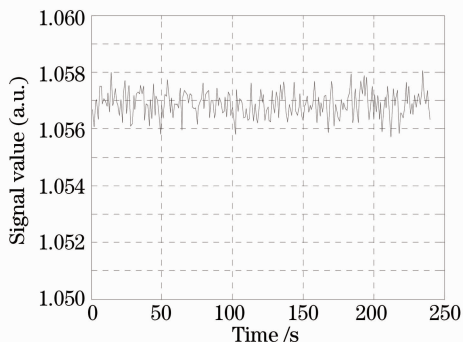


图 10 系统稳定性实验

Fig. 10 Experiment on system stability

快(约 3 s)即达到稳定值,表明该气室的时间响应特性良好,适于进行现场动态测量。

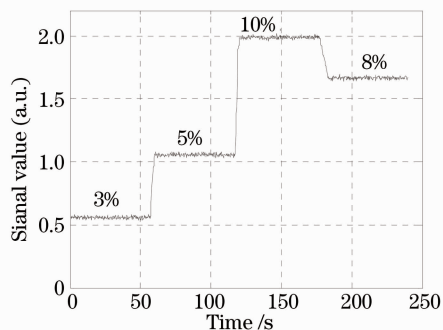


图 11 系统动态响应特性实验

Fig. 11 Experiment on system dynamic response characteristics

4 结 论

设计了一个结构小巧、灵敏度可调的棱镜气室,基于 Beer-Lambert 定律的近似表示,运用谐波检测与比值处理技术,实现了宽广体积分数范围(0~20%)内高灵敏度(体积分数为 1.5×10^{-5})的甲烷检测。在线实验结果表明,该系统的动态响应及稳定性良好,可作为矿井巷道及天然气管道沿线的甲烷体积分数监测仪器。结合空分或时分复用技术可构建多点准分布式甲烷监测系统,降低系统单点测量成本,提高系统应用价值。

参 考 文 献

- Wang Tiejun, Zhang Lei, Dong Lei *et al.*. Minimum detection limit for methane with single laser remote sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 405~407
王铁云, 张雷, 董磊等. 激光遥测甲烷气体最低可探测体积分数[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 405~407
- Wang Shimei, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. The study of remote sensing CH_4 volume fraction based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(2): 221~224
汪世美, 刘文清, 刘建国等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱遥测 CH_4 体积分数[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(2): 221~224
- Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao *et al.*. Experimental study on harmonic detection of methane by use of a digital lock-in amplifier[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(3): 473~476
董磊, 马维光, 尹王保等. 利用数字锁相放大器对甲烷气体进行谐波探测的实验研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(3): 473~476
- Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 67~70
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷检测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 67~70
- Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with

- high sensitivity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1217~1220
- 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的体积分数变化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1217~1220
- 6 Peter Werle. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 1998, **54**(2): 197~236
- 7 Miha Zavrsnik, George Stewart. Theoretical analysis of a quasi-distributed optical sensor system using FMCW for application to trace gas measurement [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **B71**(1-2): 31~35
- 8 Yu Hongbo, Liao Yanbiao, Lai Shurong *et al.*. Optical fiber gas sensor network with intracavity spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 154~158
- 喻洪波, 廖延彪, 赖淑蓉等. 光纤有源内腔激光传感网络技术[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 154~158
- 9 Gillian Whitenett, George Stewart, Hongbo Yu *et al.*. Investigation of a tuneable mode-locked fiber laser for application to multipoint gas spectroscopy[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(3): 813~819
- 10 Xiao Shaorong, Chen Jinbang, Zhu Rihong *et al.*. Photometric measurement based on rectangular prism with optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1513~1517
- 肖韶荣, 陈进榜, 朱日宏等. 基于直角棱镜的光纤光度传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1513~1517
- 11 Xiao Shaorong, Gao Zhishan, Zhu Rihong *et al.*. Automatic setting of sensitivity in atmospheric monitor sensor with optical fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(2): 248~252
- 肖韶荣, 高志山, 朱日宏等. 大气监测中光纤气体传感器灵敏度的自动设定[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(2): 248~252
- 12 Xiao Shaorong, Gao Zhishan, Liao Yanbiao. Application of gas sensor based on rectangular prism in the monitoring of atmospheric visibility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 81~84
- 肖韶荣, 高志山, 廖延彪. 基于直角棱镜的气体传感器在能见度测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 81~84
- 13 Dong Lei, Ma Weiguang, Yin Wangbao *et al.*. High resolution measurements of line strength of methane at $2\nu_3$ band R9 manifold[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 709~712
- 董磊, 马维光, 尹王保等. 甲烷气体 $2\nu_3$ 带 R9 支吸收线强度的精确测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 709~712
- 14 Joel A. Silver. Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(6): 707~717
- 15 Takaya Iseki, Hideo Tai, Kiyoshi Kimura. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**(6): 594~602