

基于 TDLAS-WMS 的甲烷泄漏遥测系统研制

徐俊¹, 李云飞^{3,4*}, 程跃^{3,4}, 檀剑飞⁴, 刘东², 周振¹¹安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601;²安徽建筑大学机械与电子工程学院, 安徽 合肥 230601;³清华大学合肥公共安全研究院, 安徽 合肥 230601;⁴安徽泽众安全科技有限公司, 安徽 合肥 230601

摘要 针对甲烷气体泄漏高精度、非接触和远距离探测的需求, 提出一种基于 TDLAS-WMS 的甲烷泄漏遥测系统。该系统采用高级精简指令集机器 (ARM) 和现场可编程门阵列 (FPGA) 双核架构, FPGA 实现数字锁相解调提取一次谐波 (1f) 和二次谐波 (2f) 信号, ARM 通过串行外设接口 (SPI) 实时接收 FPGA 解调的 1f、2f 信号并传送至 Labview 进行谐波信号分析和甲烷浓度在线解调。通过 2f/1f 信号处理技术消除光强与靶标反射系数的变化对系统测量结果的影响。研究同等实验条件下 0~90 m 范围内谐波信号与探测距离的关系, 结果表明, 2f/1f 信号处理技术对噪声抑制效果显著。测量不同积分浓度的谐波信号, 采用最小二乘法对 2f/1f 和气体积分浓度数据进行线性拟合, 获得系统标定线性度, 为 0.9966。对系统误差进行实验测量和分析, 在 0~2000×10⁻⁶ m 范围内, 系统测量最大相对误差为 -3.66%, 最小为 -0.23%。利用 1500×10⁻⁶ m 甲烷浓度的二次谐波信号评估系统的检测下限为 70.5×10⁻⁶ m。结果表明, 设计和研制的甲烷泄漏遥测系统可广泛应用于城市燃气场站和天然气管网等场合的燃气突发泄漏监测预警。

关键词 遥感; 甲烷气体遥测; TDLAS; 波长调制光谱; FPGA

中图分类号 O433.5+1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213323

Development of Methane Leakage Telemetry System Based on TDLAS-WMS

Xu Jun¹, Li Yunfei^{3,4*}, Cheng Yue^{3,4}, Tan Jianfei⁴, Liu Dong², Zhou Zhen¹¹School of Electric and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;²School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;³Hefei Institute of Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 230601, Anhui, China;⁴Anhui Theone Safety Technology Co, Ltd., Hefei 230601, Anhui, China

Abstract A methane leakage telemetry system based on TDLAS-WMS is proposed in this study to meet the high-precision, non-contact, and long-distance detection requirements of methane leakage. The system adopts a dual core advanced RISC machine (ARM) and field programmable gate arrays (FPGA) and design, where FPGA realizes the digital phase-locked demodulation to extract the first (1f) and second harmonic (2f) signals. Furthermore, ARM receives the 1f and 2f signals demodulated by FPGA in real time through serial peripheral interface (SPI) and relays them to Labview for harmonic signal analysis and methane concentration online demodulation. Using 2f/1f signal processing technology, the influence of change in light intensity and target reflection coefficient on the system measurement results is eliminated. The relationship between harmonic signal and detection distance in the range of 0–90 m under the same experimental conditions are studied. Results reveal that 2f/1f signal processing technology has a considerable effect on noise suppression. The harmonic signals with different integrated concentrations are measured, 2f/1f and gas integrated concentration data are linearly fitted by the least squares method, and system calibration linearity is obtained, which is 0.9966. Moreover, the system error is measured and analyzed experimentally. Within the range of 0–2000×10⁻⁶ m, the maximum and minimum relative errors of system measurements are -3.66% and -0.23%, respectively. Using 1500×10⁻⁶ m, the detection limit of the second harmonic signal evaluation system for methane concentration is determined to be 70.5×10⁻⁶ m. Results indicate that the designed and developed methane leakage telemetry system can be widely used in the monitoring

收稿日期: 2021-12-23; 修回日期: 2022-01-13; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0809304)、安徽省人工智能产业创新发展项目

通信作者: *uc_fly@163.com

and early warning of sudden gas leakage in urban gas stations and natural gas pipelines.

Key words remote sensing; methane gas telemetry; TDLAS; wavelength modulated spectrum; field programmable gate arrays

1 引言

甲烷(CH₄)是天然气的主要成分,属于易燃易爆的气体^[1-2]。甲烷泄漏威胁着人民财产和生命安全。2021年,湖北十堰市张湾区艳湖社区集贸市场“6·13”重大燃气爆炸事故造成 26 人死亡和 138 人受伤。为此,2021 年 9 月,中共中央办公厅、国务院办公厅专门印发《关于推进城市安全发展的意见》,着重强调城市燃气管网及其相邻空间安全运行风险监测预警。因此,有必要研究和开发相应的甲烷泄漏遥测系统或设备。

传统的甲烷泄漏检测方法包括压力流量检测法、催化燃烧检测法及人工巡检法^[3],具有精度低、维护成本高和需近距离接触气体环境等缺陷。为防止在检测过程中,人为身陷有毒有害和易燃易爆气体之中,部分学者对气体遥测技术开展了研究。Reid 等^[4]将二次谐波(2f)实验和理论进行对比,推动了波长调制(WM)技术的发展;董凤忠等^[5]利用可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS)成功研制出道边实时监测机动车尾气的仪器,该仪器可监测出一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO₂)等有害气体,降低研发成本的同时实现高精度探测。与传统的检测方法相比,TDLAS 具有高灵敏度、快速响应和大空间开放光路测量等优势^[6-8],可实现甲烷等易燃易爆有毒泄漏气体的远距离精准探测,保障人身安全。TDLAS 技术分为波长调制光谱(WMS)技术和直接吸收光谱技术(DAS)。相较于 DAS 技术,WMS 技术可以消除外部环境干扰而造成的低频噪声。因此,TDLAS-WMS 技术可以有效地检测光电探测器接收的低频信号、提高甲烷泄漏气体的检测灵敏度^[9-10]。目前市场上云台式激光甲烷遥测系统相关产品均采用 DAS 技术,其探测精度低(±10%甚至±20%)、灵敏度低。例如:禾赛科技 DM100 和安森智能 ACZS-1 云台式激光甲烷遥测仪测量误差为±10%;大连艾科 LROA01 云台式线型光束可燃气体探测器测量误差为 20%。因此,设计和研制一款高精度、高灵敏度的激光甲烷遥测系统以满足甲烷突发泄漏精准探测的需要是非常必要的。

TDLAS-WMS 技术中的核心是一次谐波(1f)与 2f 信号的提取,通过 2f/1f 峰值之比可以有效地消除光强对测量结果的影响^[11-12]。为了使 2f 信号峰值达到最大,在现场可编程门阵列(FPGA)程序中需要动态调整调制系数 m 值^[13-14]。目前 1f 与 2f 信号的提取有不同方法,如通过后处理算法的 Labview 实现对 1f、2f 信号的提取^[15],利用锁相放大器硬件电路提取 1f、2f 信号^[16-17]。本文利用 FPGA 的硬件可编程特性,对光电

探测器接收到的吸收光谱信号进行数字锁相解调以提取 1f、2f 信号,这样既具有上位机后处理算法的灵活性,又具有锁相放大器硬件电路方法的高效性。并通过低通滤波算法去除谐波信号中设定值范围之外的干扰噪声^[18]。实验研究了 2f/1f 信号处理技术对系统噪声抑制效果,采用不同浓度甲烷标准气体对系统测量范围进行了分析,研究了系统的线性区间,并开展了系统标定实验、误差分析测量和检测下限评估。

2 遥测系统工作原理

2.1 比尔-朗伯定律

当一束激光透过被测气体时,激光光强衰减遵循比尔-朗伯定律(Beer-Lambert law),其表达式为

$$\begin{cases} I_t = I_0 \exp[-a(v)CL] \\ a(v) = S(T)\varphi(v)N \end{cases}, \quad (1)$$

式中: I_t 为出射光强; I_0 为入射光强; C 为气体浓度; L 为光程; $a(v)$ 为气体吸收系数; $S(T)$ 为气体吸收谱线的线性强度; $\varphi(v)$ 为线性函数; N 为气体分子密度。

2.2 波长调制光谱技术

通过调制激光器的驱动电流,改变激光器的输出频率和输出光强。

$$v = \bar{v} + \alpha \cos \omega t, \quad (2)$$

$$I_0 = \bar{I}_0 [1 + i_1 \cos(\omega t + \phi_1)], \quad (3)$$

式中: \bar{v} 为激光中心频率; α 为调制幅度; ω 为正弦调制频率; t 为时间; \bar{I}_0 为激光在中心频率 \bar{v} 处的平均强度; i_1 为线性强度调制度(由 \bar{I}_0 归一化得到); ϕ_1 为线性强度调制相移。对式(1)中的气体吸收系数 $a(v)$ 进行傅里叶级数展开:

$$a(v)L = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\bar{v}, \alpha) \cos(n\omega t), \quad (4)$$

式中: $A_n(\bar{v}, \alpha)$ 为吸收系数的第 n 阶傅里叶展开系数。式(4)中的 n 次谐波分量可表示为

$$A_0(\bar{v}, \alpha) = \frac{PCL}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(T) \times \varphi[\bar{v} + \alpha \cos(\omega t)] d\omega t, \quad (5)$$

$$A_n(\bar{v}, \alpha) = \frac{PCL}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(T) \times \varphi[\bar{v} + \alpha \cos(\omega t)] \times \cos(n\omega t) d\omega t, \quad (6)$$

式中: P 为气体压强。由式(6)可知,吸收系数 $a(v)$ 的各阶傅里叶系数的幅值皆正比于气体浓度和光程的乘积。采用 WMS-2f/1f 技术消除靶标实际反射率未知对测量结果的影响。以 FPGA 为主控芯片实现数字锁相解调,将 1f 和 2f 信号从光电探测器探测到的电信号分离出来。2f 信号幅值可表示为

$$S_{2f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} A_2, \quad (7)$$

式中: G 为光电探测器的响应系数。1f 信号幅值可表示为

$$S_{1f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} i_{0o}. \quad (8)$$

因此, 用 1f 信号归一化 2f 信号得,

$$S_{2f}/S_{1f} = \frac{A_2}{i_0} = \frac{PCLS(T)}{\pi i_0} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(2\omega t) \times \varphi[\bar{v} + \alpha \cos(\omega t)] d\omega t. \quad (9)$$

由式(9)可知, 2f/1f 信号处理技术可消除光强和靶标反射系数的变化对测量结果的影响。此外, 2f/1f 峰值之比和浓度存在线性关系。

2.3 CH₄ 吸收谱线的选择

选取合适的 CH₄ 吸收谱线能有效提升甲烷泄漏遥测系统的测量精度, 降低其他干扰气体对系统检测精度的影响。查阅 HITRAN 2020 数据库^[19], 空气中水(H₂O)和 CO₂ 是 CH₄ 吸收的主要干扰气体。图 1 为 CH₄ 分子在 5800~6800 cm⁻¹ 和 6040~6050 cm⁻¹ 波数范围内的吸收线线强。CH₄ 分子在 6046.995 cm⁻¹ (1653.72 nm) 处的吸收线强最强, 数量级为 10⁻²¹ cm⁻¹·mol⁻¹·cm⁻², 而 H₂O 和 CO₂ 在此处的吸收线强数量级均小于 10⁻²⁵ cm⁻¹·mol⁻¹·cm⁻², 对 CH₄ 分子吸收无干扰。因此, 选择 6046.995 cm⁻¹ (1653.72 nm) 处的吸收线作为 CH₄ 浓度检测的吸收谱线。

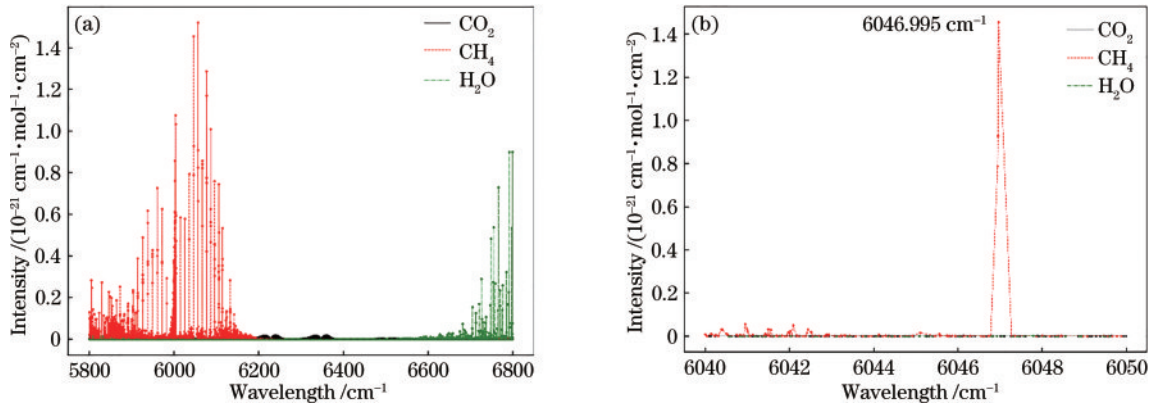


图 1 CH₄ 在不同范围内的吸收谱线。(a) 5800~6800 cm⁻¹; (b) 6040~6050 cm⁻¹

Fig. 1 Absorption spectra of CH₄ in different ranges. (a) 5800~6800 cm⁻¹; (b) 6040~6050 cm⁻¹

3 遥测系统设计

激光甲烷遥测系统由光学遥测组件、嵌入式一体化模块和上位机组成, 如图 2 所示。DDS 信号发生器产生 40 Hz 低频锯齿波和 20 kHz 高频正弦波。FPGA

将产生的叠加了正弦波调制信号的锯齿波电压信号经过 6 阶无源巴特沃思低通滤波器以去除 DAC 输出信号的高频成分, 再通过运算放大器将电压信号转换为电流信号驱动 DAC 发射电压信号。DAC 芯片连接三极管基电极发射极恒电流源驱动分布反馈式激光器

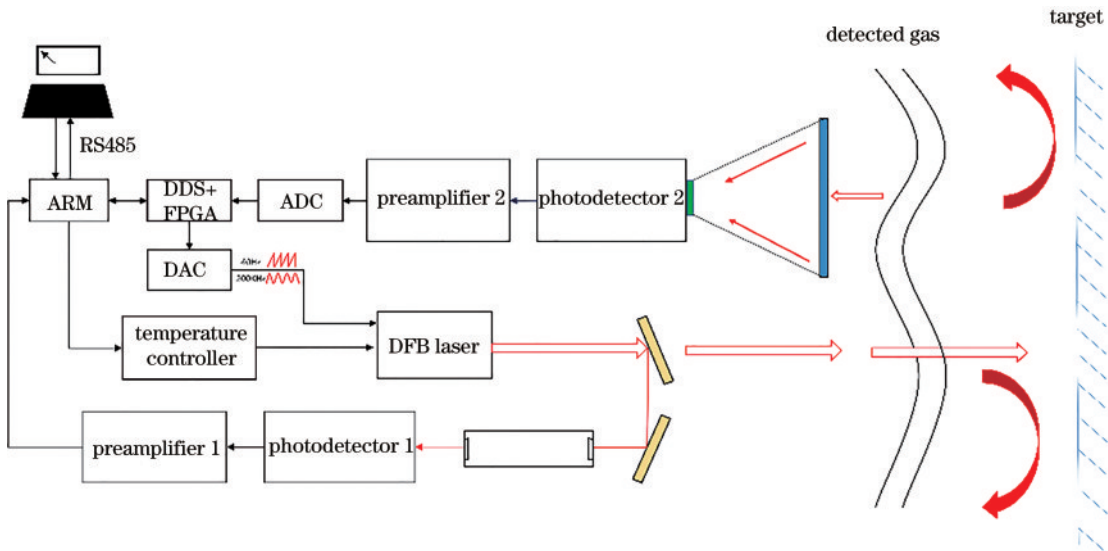


图 2 遥测系统整体结构设计图

Fig. 2 Overall structure design drawing of telemetry system

(DFB), 驱动电流为 50~90 mA, 同时通过调整 TEC 控制芯片 MAX8521 前级平衡电桥电阻将 DFB 工作温度恒温至 28 °C, 使得可调谐 DFB 发出近红外光, 近红外激光波长覆盖甲烷气体在 1653.72 nm 的特征吸收峰。发射光束通过甲烷气体后被靶标反射, 之后被与发射激光同轴的大口径透镜接收, 聚焦于近红外光电探测器。光电探测器将探测到的光电流信号转换为电压信号, 再经过 LC 滤波电路去除高频杂波信号后经可编程增益放大器 PGA113 将电压放大到合适范围内, 最后经过模拟数字转换器(ADC)电路将模拟信号转换成数字信号传输至 FPGA 进行数字锁相解调提取出 1f、2f 信号。ARM 将提取的 1f、2f 信号通过 RS485 通信总线传送至 Labview。同时, ARM 接收 Labview 发送数据、停止发送、校准浓度指令, 执行相

应的操作。此外, 发射光可射入参考气室被待测气体吸收, 之后光电探测器将探测到的回波信号送至 ARM 进行自适应寻峰调节。

3.1 系统硬件结构设计

图 3 为甲烷遥测系统实物图, 其中光学遥测组件由 DFB、激光准直器、可见指示激光、光电探测器、信号接收光学透镜等组成。DFB 中心波长稳定在 1653.72 nm 附近, 输出线型宽度约为 2 MHz, 功率为 10 mW; 光电探测器选用 TO 封装的 InGaAs PIN 型光电二极管, 其可测波长范围为 900~1700 nm, 有效探测面直径为 1000 μm; 嵌入式一体化模块由温控电路、DDS 信号发生器、ADC、DAC、FPGA、ARM 组成。FPGA 和 ARM 型号分别选用 Altera EP4CE10F 和 STM32F429。

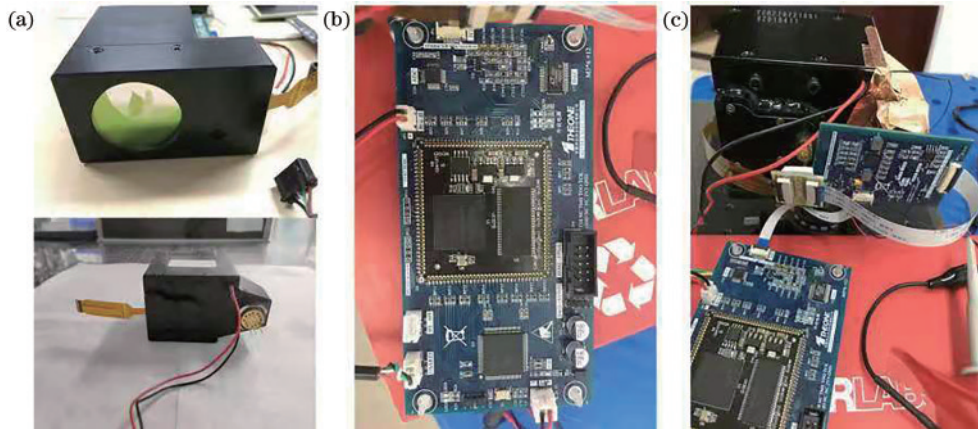


图 3 甲烷遥测系统结构图。(a)光学遥测组件;(b)FPGA+ARM 激光调制、信号采集、处理解调嵌入式一体化模块;(c)遥测组件和嵌入式一体化模块连接图

Fig. 3 Structure diagrams of methane telemetry system. (a) Optical telemetry components; (b) FPGA + ARM laser modulation, signal acquisition, processing, and demodulation embedded integrated module; (c) connection diagram of telemetry component and embedded integrated module

3.2 系统软件结构设计

3.2.1 FPGA 软件设计

FPGA 具有可编程灵活性高、开发周期短、并行计算能力强的特点^[20-21]。为了获取谐波信号最大幅值,

设置调制系数 $m=2^{[22]}$ 改变谐波信号调制深度。

FPGA 作为主控核心, 实现了驱动 DAC 发射电压信号、ADC 同步采集信号、谐波信号提取、数字锁相解调、低通滤波及相关硬件数据传输接口的功能, 如图 4 所示。

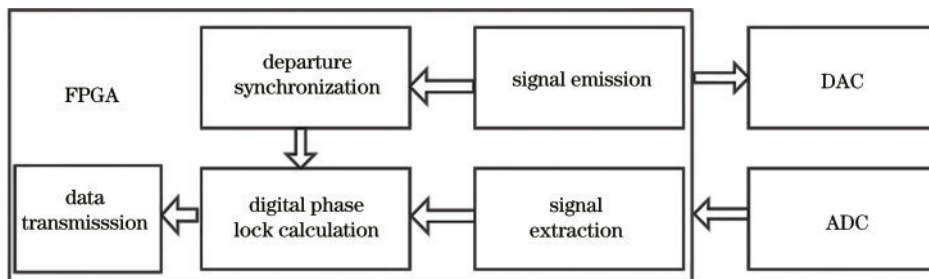


图 4 FPGA 内部结构图

Fig. 4 Internal structure diagram of FPGA

3.2.2 FPGA 数字锁相解调算法

每个正弦信号周期有 100 个采样点, 激光二极管发射光信号后经过气体吸收后通过靶标反射, 光电探

测器探测回波信号, 回波数据采集周期为 5 μs, 如图 5 所示。100 个采样点存储在 FPGA 的 ROM 中, 每个采样点分别乘以一倍正弦函数和二倍正弦函数得出两个

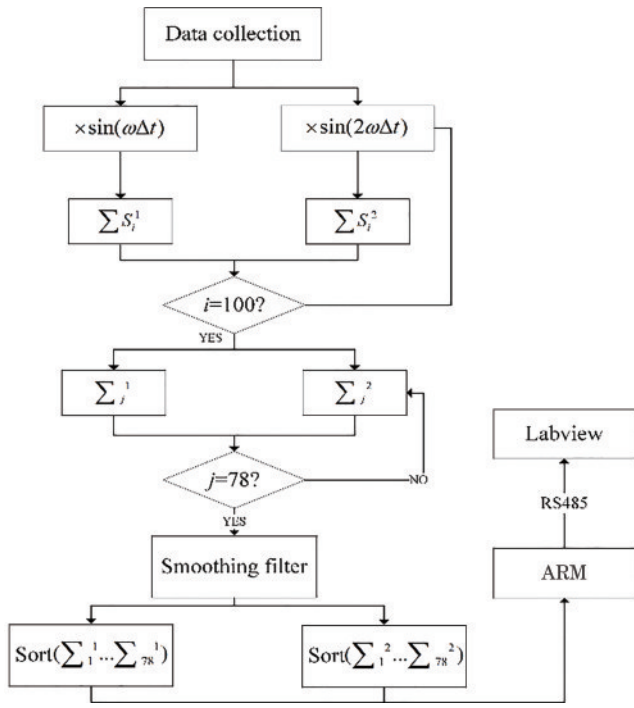


图 5 FPGA 谐波信号解调流程图

Fig. 5 Flowchart of FPGA harmonic signal demodulation

值,同时通过变量 i 的累加值判断 i 是否为 100,之后分别累加 100 个采样点乘以一倍正弦函数和二倍正弦函数的值,即可得出一次谐波数据点和二次谐波数据点,通过判断得出的数据点个数为 78 后进行滤波,且

对数据点进行排序,最后通过 ARM 将数据输出 Labview。

3.2.3 ARM 结构设计

FPGA 将谐波信号通过串行外设接口(SPI)总线实时传送给 ARM,ARM 通过 RS485 通信总线将谐波信号传送到 Labview,进一步对谐波信号波形进行分析。此外,ARM 实时接收 Labview 命令选择开始发送谐波信号或停止发送谐波信号。

4 系统实验与结果分析

4.1 2f/1f 信号处理技术实验与分析

甲烷遥测系统采用 2f/1f 信号处理技术来消除激光光强波动、靶标反射系数变化等对系统的影响。为了验证 2f/1f 抑制噪声的效果,系统采用 4000×10^{-6} m 气体采样袋进行测量验证。以实验室走廊为背景,将同一气体采样袋放置在走廊的另一端。在 0~90 m 范围内,移动采样袋至不同距离,并且使得红外激光束扫描至气体采样袋的同一处,以白色纸壳板为靶标。通过探测得到的回波信号,从上位机获取 1f 和 2f 信号峰值,结果如图 6 所示。由图 6 可知,1f 和 2f 信号峰值随着靶标的移动距离不断增大呈单调递减趋势,信号值变化较大且波动起伏较大,而 2f/1f 信号峰值之比随探测距离增加基本不变化且波动较小,标准差仅为 0.05,表明采用 2f/1f 信号处理技术时,系统的噪声抑制效果较好。

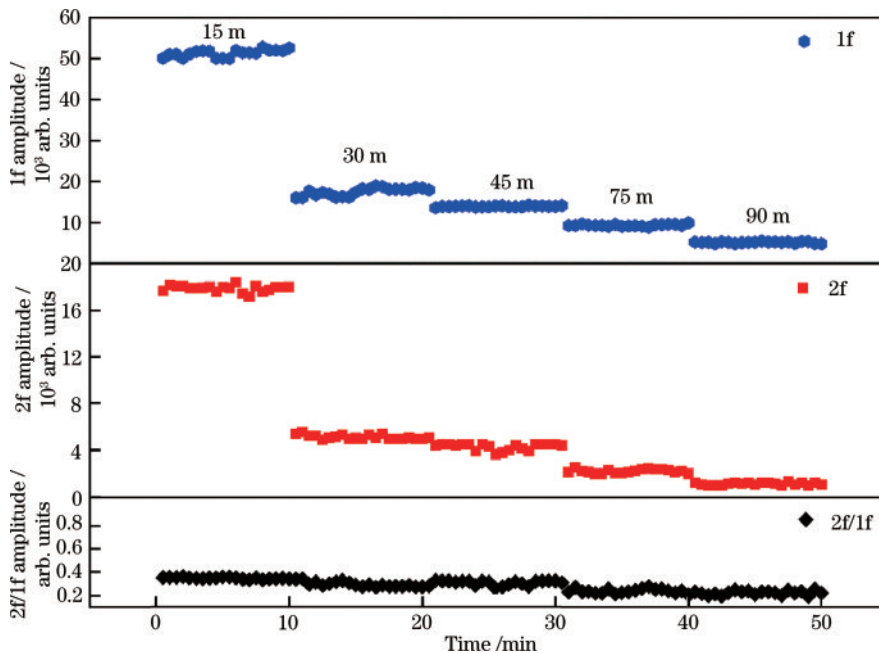


图 6 1f、2f 和 2f/1f 信号值与探测距离实验结果

Fig. 6 Experimental results of 1f, 2f, and 2f/1f signal value and detection distance

4.2 系统测量范围实验

选取 0×10^{-6} m、 250×10^{-6} m、 450×10^{-6} m、 1100×10^{-6} m、 1800×10^{-6} m、 1800×10^{-6} m、 2000×10^{-6} m、 4000×10^{-6} m、 6500×10^{-6} m、 8600×10^{-6} m、 $10400 \times$

10^{-6} m、 13000×10^{-6} m、 17600×10^{-6} m、 26000×10^{-6} m 的甲烷对系统测量范围进行实验研究,结果如图 7 所示:在 $0 \sim 2000 \times 10^{-6}$ m 范围内,系统线性度为 0.9966;在 $2000 \times 10^{-6} \sim 26000 \times 10^{-6}$ m 范围内,系统出现非线性

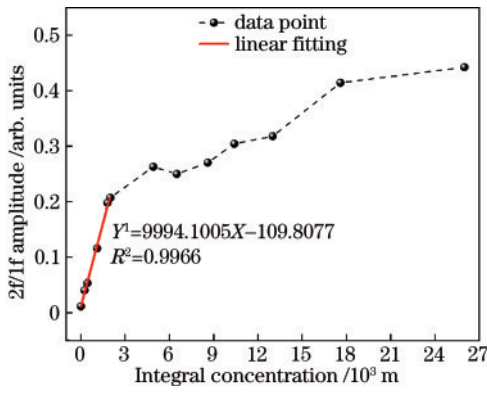


图7 0~26000×10⁻⁶ m 浓度范围系统测量

Fig. 7 System measurement of in range of 0-26000×10⁻⁶ m concentration

性效应,线性度较差。

4.3 系统标定实验

在 0~2000×10⁻⁶ m 浓度范围内,系统测量的线性度较好,因此,在该范围内进行系统的标定实验,结果如图 8 所示。提取不同的浓度甲烷的 2f 信号和 1f 信

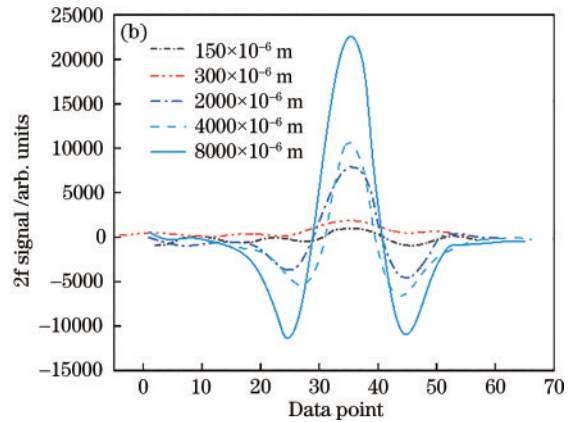
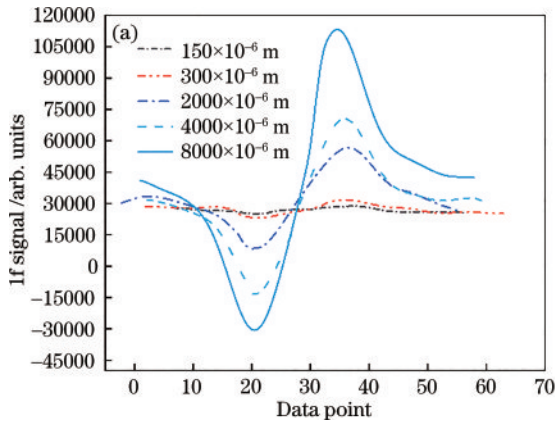


图8 不同浓度谐波信号图。(a) 1f信号图;(b) 2f信号图

Fig. 8 Harmonic signal diagrams of different concentrations. (a) 1f signal diagram; (b) 2f signal diagram

表1 系统标定实验数据

Table 1 System calibration experiment data

No.	integral concentration /10 ⁻⁶ m	2f/1f average amplitude /arb. units	2f/1f standard deviation
1	0	0.0115	0.0011
2	250	0.0403	0.0031
3	450	0.0533	0.0017
4	1100	0.1159	0.0034
5	1800	0.1981	0.0047
6	2000	0.2071	0.0016

4.4 系统测量误差分析

为了评估系统测量误差和精度,在与标定同等条件下,以 400×10⁻⁶ m、850×10⁻⁶ m、1300×10⁻⁶ m、1650×10⁻⁶ m、1850×10⁻⁶ m 等 5 种浓度为测试数据进行系统误差测量实验,结果如图 11 所示。图 11 表明浓度和测量浓度值二者的线性相关性,经线性拟合后得

$$Y' = 0.9507X + 23.4829. \quad (11)$$

号,观察气体谐波信号的变化。随着甲烷气体积分浓度的增加,谐波信号幅值不断增大。

在浓度为 0×10⁻⁶ m 处进行谐波信号测量时,采用 N₂ 填充气体采样袋。发射光入射角度发生微小变化会导致光程发生改变,250×10⁻⁶~2000×10⁻⁶ m 范围内的测量结果会因为光程的改变导致波动较大,而对 0×10⁻⁶ m 处测量结果影响微小,测量值波动较小。表 1 为系统标定实验数据,0×10⁻⁶ m 处的标准差为 1.1×10⁻³,250×10⁻⁶~2000×10⁻⁶ m 范围内标准差为 1.61×10⁻³~4.68×10⁻³。图 9 为 0~2000×10⁻⁶ m 范围内 2f/1f 峰值变化,在 0×10⁻⁶ m 处的测量结果波动弱于 250×10⁻⁶~2000×10⁻⁶ m 范围内的测量结果波动。

图 10 为选取 0×10⁻⁶ m、250×10⁻⁶ m、450×10⁻⁶ m、1100×10⁻⁶ m、1800×10⁻⁶ m、2000×10⁻⁶ 的甲烷对 2f/1f 信号和气体浓度进行线性拟合的结果图。拟合公式为

$$Y = 9994.1005X - 109.8077, \quad (10)$$

式中:Y 为浓度;X 为 2f/1f 峰值之比。拟合曲线的线性拟合系数为 0.9966,表明 2f/1f 信号和甲烷气体浓度的线性相关性良好。

线性拟合系数 R²=0.9999,表明积分浓度和测量浓度值非常接近,线性关系良好。

表 2 为系统反演实验数据,系统最大测量误差为 -3.66%,最小为 -0.23%,可知系统的测量精度较高,远低于目前市场上甲烷遥测系统相关产品的 ±10%~±20% 的测量误差。

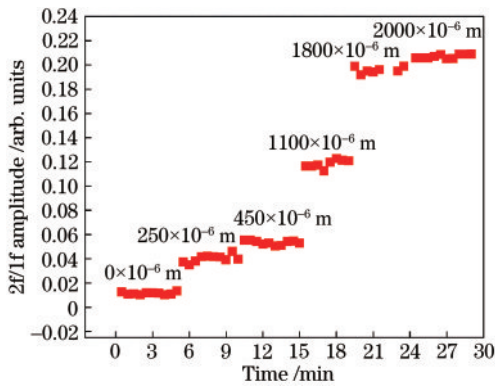


图 9 0~2000×10⁻⁶ m 范围内 2f/1f 峰值变化

Fig. 9 Change of 2f/1f peak value in the range of 0~2000×10⁻⁶ m

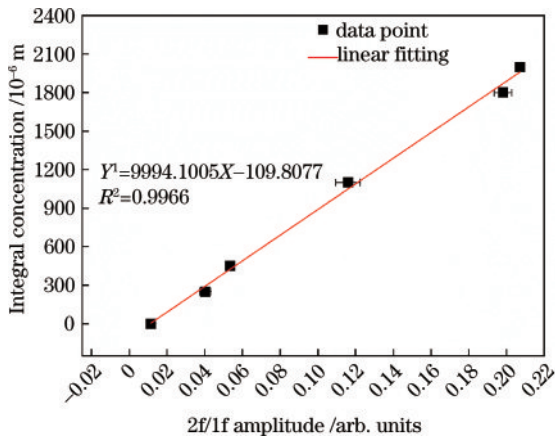


图 10 2f/1f 信号和浓度拟合曲线图

Fig. 10 2f/1f signal and concentration fitting curve

4.5 系统检测下限评估

检测下限是检测系统的重要指标。为了测量系统的检测下限,选用 1500×10⁻⁶ m 和 0×10⁻⁶ m 甲烷标

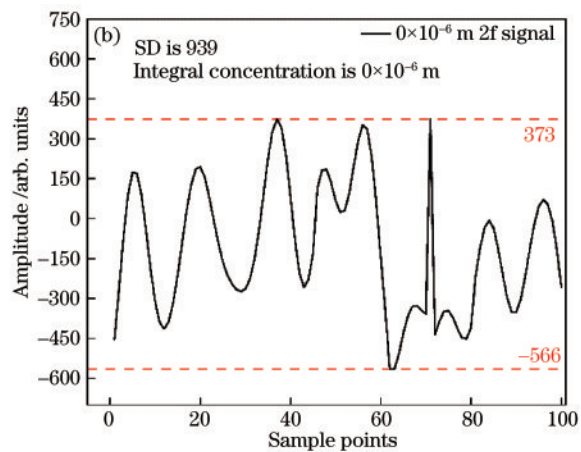
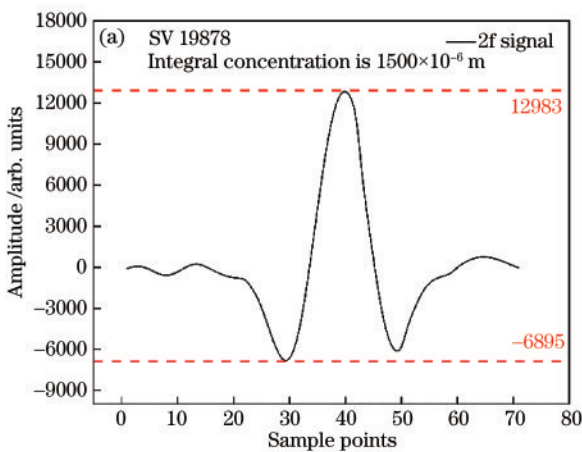


图 12 检测下限测量。(a) 1500×10⁻⁶ m 甲烷浓度 2f 信号图;(b) 0×10⁻⁶ m 甲烷浓度系统噪声图

Fig. 12 Measurement of detection lower limit.(a) 2f signal diagram of 1500×10⁻⁶ m methane concentration; (b) noise diagram of 0×10⁻⁶ m methane concentration system

5 结 论

介绍了一种基于 TDLAS-WMS 的甲烷泄露遥测

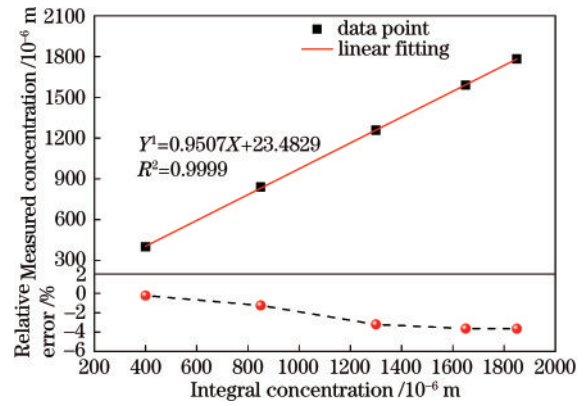


图 11 不同浓度的测量误差

Fig. 11 Measurement error of different concentration

表 2 系统反演实验数据

Table 2 System inversion experimental data

No.	Integral concentration / 10 ⁻⁶ m	Measured concentration / 10 ⁻⁶ m	Absolute error / 10 ⁻⁶ m	Relative error / %
1	400	399.092	-0.0023	-0.23
2	850	839.332	-10.6680	-1.26
3	1300	1258.185	-41.8150	-3.22
4	1650	1589.989	-60.0110	-3.64
5	1850	1782.275	-67.7250	-3.66

准浓度采样袋,经数字锁相解调算法提取 2f 信号,结果如图 12 所示。甲烷浓度为 1500×10⁻⁶ m 时,2f 幅值(SV)为 19878;甲烷浓度为 0 时,噪声幅值(SD)为 939,2f 信噪比 R_{SN} 为 22.9538。经计算,检测下限约为 7.05×10⁻⁵。因此,系统最低可检测 70.5×10⁻⁶ m。

系统,选取 CH₄ 分子在 1653.72 nm 附近吸收峰作为气体吸收谱线。根据激光器的驱动特性,自主研发了温控电路和激光器驱动电路,使得激光器中心波长稳定

在 1653.72 nm 附近。

针对光强变化引起的检测精度下降问题,采用了 $2f/1f$ 信号处理技术,利用 FPGA 实现数字锁相解调,提取 $1f$ 和 $2f$ 信号。实验结果表明, $2f/1f$ 信号处理技术方法针对抑制噪声具有较好效果,提高了系统检测精度。

被测甲烷气体浓度在 $0\sim 2000\times 10^{-6}$ m 范围内时,检测结果线性拟合系数 $R^2=0.9966$,呈现较好的线性关系,且相对测量误差最大为 -3.66% ,最小为 -0.23% ,满足甲烷泄漏高精度、非接触和远距离测量的实际需求。

参 考 文 献

- [1] Zhang L W, Pang T, Zhang Z R, et al. A novel compact intrinsic safety full range Methane microprobe sensor using "trans-world" processing method based on near-infrared spectroscopy[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 334: 129680.
- [2] He D, Peng Z M, Ding Y J. Ignition-delay-time/time-resolved CO₂-concentration measurements during the combustion of iC₄H₁₀/H₂ mixtures[J]. Fuel, 2021, 284: 118980.
梁运涛, 陈成锋, 田富超, 等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 40-48.
Liang Y T, Chen C F, Tian F C, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 40-48.
- [3] 梁运涛, 陈成锋, 田富超, 等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 40-48.
Liang Y T, Chen C F, Tian F C, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 40-48.
- [4] 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.
- [5] 董凤忠, 刘文清, 刘建国, 等. 机动车尾气的道边在线实时监测(上)[J]. 测试技术学报, 2005, 19(2): 119-127.
Dong F Z, Liu W Q, Liu J G, et al. On-line roadside vehicle emissions monitoring(part 1)[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2005, 19(2): 119-127.
- [6] 李金义, 樊鸿清, 余子威, 等. 非合作目标 TDLAS 室内二氧化碳遥测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 229-236.
Li J Y, Fan H Q, Yu Z W, et al. Standoff detection of indoor CO₂ using TDLAS with non-cooperative targets[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 229-236.
- [7] 张瑞林, 涂兴华. 二次谐波的变分模式分解和小波阈值函数降噪[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0210001.
Zhang R L, Tu X H. Variational mode decomposition and wavelet threshold function de-noising for second harmonics[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0210001.
- [8] 张立芳, 王飞, 蔚昊, 等. 基于波长调制的数字滤波技术的降噪研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0730001.
Zhang L F, Wang F, Wei H, et al. Denoising of digital filtering based on wavelength modulation spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0730001.
- [9] 卢伟业, 朱晓睿, 李越胜, 等. TDLAS 直接吸收法和波长调制法在线测量 CO₂ 的比较[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 0717002.
Lu W Y, Zhu X R, Li Y S, et al. Comparison of direct absorption and wavelength modulation methods for online measurement of CO₂ by TDLAS[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 0717002.
- [10] 王彪, 鹿洪飞, 李奥奇, 等. 采用 VCSEL 激光光源的 TDLAS 甲烷检测系统的研制[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(4): 0405002.
Wang B, Lu H F, Li A Q, et al. Research of TDLAS methane detection system using VCSEL laser as the light source[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(4): 0405002.
- [11] 李金义, 樊鸿清, 田鑫丽, 等. 大气环境条件下波长调制光谱无标测量的压强修正[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1407-1412.
Li J Y, Fan H Q, Tian X L, et al. Pressure correction for calibration-free measurement of wavelength modulation spectroscopy in atmospheric environment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(5): 1407-1412.
- [12] Lu H B, Zheng C T, Zhang L, et al. A remote sensor system based on TDLAS technique for ammonia leakage monitoring[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2448.
- [13] 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.
- [14] 阚玲玲, 叶蕾, 王喜良, 等. 基于 TDLAS 技术的甲烷气体浓度识别系统[J]. 化工自动化及仪表, 2021, 48(2): 122-127, 133.
Kan L L, Ye L, Wang X L, et al. Identification of methane concentration based on TDLAS technology system[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2021, 48(2): 122-127, 133.
- [15] 吕淑媛, 王峰, 刘崇琪. 基于 TDLAS-WMS 的 CO₂ 检测系统研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(3): 52-54, 57.
Lü S Y, Wang F, Liu C Q. Research on CO₂ detection system based on TDLAS-WMS[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(3): 52-54, 57.
- [16] 张瑞峰, 王晓洋. 可调谐激光遥测甲烷浓度的研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(6): 76-79, 84.
Zhang R F, Wang X Y. Remote sensing of methane concentration using tunable diode laser[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(6): 76-79, 84.
- [17] 周言文, 苗澍苗, 姚丹, 等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0611001.
Zhou Y W, Miao S Z, Yao D, et al. Laser methane remote sensor system based on wavelength modulation spectroscopy and wavelet denoising[J]. Chinese Journal

- of Lasers, 2020, 47(6): 0611001.
- [18] 叶玮琳, 涂子涵, 肖旭鹏, 等. 基于 LabVIEW 的 TDLAS 检测系统多参数影响研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 141-148.
Ye W L, Tu Z H, Xiao X P, et al. On multi-parameter influence of TDLAS detection system based on LabVIEW[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(6): 141-148.
- [19] 马砺, 范新丽, 张朔, 等. 基于 TDLAS 技术的 CH₄ 气体检测与温度补偿方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(11): 3632-3638.
Ma L, Fan X L, Zhang S, et al. Research on CH₄ gas detection and temperature correction based on TDLAS technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(11): 3632-3638.
- [20] 刘腾达, 朱君文, 张一闻. FPGA 加速深度学习综述[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(11): 2093-2104.
Liu T D, Zhu J W, Zhang Y W. Review on FPGA-based accelerators in deep learning[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2021, 15(11): 2093-2104.
- [21] 周彦臻, 吴瑞东, 于潇, 等. 面向 FPGA 部署的 CNN-SVM 算法研究与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 90-98.
Zhou Y Z, Wu R D, Yu X, et al. Research and implementation of CNN-SVM algorithm based on FPGA[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 90-98.
- [22] 张志荣, 孙鹏帅, 夏滑, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术的调制参量影响及优化选择[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0114002.
Zhang Z R, Sun P S, Xia H, et al. Modulation parameters influence and optimal selection of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0114002.