

DOI:10.16136/j.joel.2023.08.0491

非合作目标高精度激光甲烷遥测参数仿真分析与实验研究

周 振¹, 程 跃^{1,2,*}, 殷松峰², 刘 东⁴, 李云飞^{2,3}, 栾 林²

(1. 安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 清华大学合肥公共安全研究院, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽泽众安全科技有限公司, 安徽 合肥 230601; 4. 安徽建筑大学 机械与电子工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:针对非合作目标激光甲烷遥测系统测量误差大、精度低和抗干扰能力差等问题,基于可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术和波长调制光谱(wavelength modulation spectroscopy, WMS)技术,利用simulink软件建立一套甲烷积分浓度遥测仿真系统。采用归一化二次谐波检测技术去除环境干扰。仿真分析了正弦波频率和调制系数 m 对归一化二次谐波信号的影响,结果表明, $m=2.2$ 为最佳调制系数,正弦波频率的大小对归一化二次谐波信号无影响,确定了甲烷积分浓度检测的有效范围为 $0\sim 2\,000\text{ ppm}\cdot\text{m}$,在该范围内,系统仿真的误差为 $-3.57\%\sim 4.06\%$ 。根据仿真结果对遥测仪进行了相关参数优化和实验研究与分析,结果表明系统测量误差为 $-4.68\%\sim 2.45\%$,采用Allan方差分析方法对系统的稳定性和检测限进行评估,该系统 5 s 积分时间内的检测下限为 $37.85\text{ ppm}\cdot\text{m}$,最佳积分时间为 345 s ,对应的检测下限为 $6.27\text{ ppm}\cdot\text{m}$ 。该研究结果对高精度激光甲烷遥测系统研发具有重要的意义。

关键词:甲烷遥测;可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS);波长调制光谱;simulink;归一化二次谐波;Allan方差

中图分类号:TH744 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2023)08-0861-11

Simulation analysis and experimental study of high precision laser methane telemetry parameters for non-cooperative target

ZHOU Zhen¹, CHENG Yue^{1,2,*}, YIN Songfeng², LIU Dong⁴, LI Yunfei^{2,3}, LUAN Lin²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 2. Hefei Institute of Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei, Anhui 230601, China; 3. Anhui Zeone Safety Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230601, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: Aiming at the problems of large measurement error, low accuracy, and poor anti-interference ability of non-cooperative target laser methane telemetry system, a set of methane integrated concentration telemetry simulation systems is established by using simulink software based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) and wavelength modulation spectroscopy (WMS) technology. The normalized second harmonic detection technology is used to remove environmental interference. The effects of sine wave frequency and modulation coefficient m on the normalized second harmonic signal are simulated and analyzed. The results show that $m=2.2$ is the best modulation coefficient, and the sine wave frequency has no effect on the normalized second harmonic signal. It is determined that the effective range of methane integral concentration detection is $0\sim 2\,000\text{ ppm}\cdot\text{m}$, within this range, the error of system simulation is $-3.57\%\sim 4.06\%$. According to the simulation results, the relevant parameters of the telemeter are optimized and experimental research and analysis are carried out. The results show

* E-mail: chengyue0408006@126.com

收稿日期:2022-08-18 修订日期:2022-09-14

基金项目:安徽省人工智能产业创新发展项目(基于非合作目标激光危化气体遥测系列化智能装备研发及应用)资助项目

that the measurement error of the system is $-4.68\% \sim -2.45\%$. The Allan variance analysis method is used to evaluate the stability and detection limit of the system. The lower detection limit of the system under the 5 s integration time is $37.85 \text{ ppm} \cdot \text{m}$, the optimal integration time is 345 s, and the corresponding lower detection limit is $6.27 \text{ ppm} \cdot \text{m}$. The research results are of great significance to the research and development of a high-precision laser methane telemetry system.

Key words: methane telemetry; tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS); wavelength modulation spectroscopy (WMS); simulink; normalized second harmonic; Allan deviation

0 引 言

近年来,天然气爆炸事件时有发生,2021年6月13日,湖北十堰发生天然气爆炸事故,导致25人死亡,138人受伤,2021年10月21日,沈阳发生燃气爆炸事故,导致5人死亡,47人受伤。针对严重的燃气爆炸事故,国务院安委办和国家应急管理部在2021年10月专门印发了《城市安全风险综合监测预警平台建设指南(试行)》,其中明确提出利用浓度视频扫描设备,即云台式激光甲烷遥测仪,实现对场站燃气泄露风险的监测预警,并确定合肥、南京和青岛等18个城市作为建设试点城市。因此,针对城市燃气管网、天然气罐区和城市重点区域燃气管线的天然气突发泄露,研究和开发先进的监测预警设备对保证人民生命和财产安全具有重要的意义。

目前,一般应对气体突发泄漏检测的方法有催化燃烧法、电化学法和固体电解质法等^[1-3]。以上检测方法普遍存在精确度低、工作效率低、需要定期标定和有较高的维护成本等一系列问题,采用可调谐半导体激光吸收光谱^[1-4](tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术的气体探测方法具有实时测量、灵敏度高和无需重复标定等优点,结合激光遥测技术,可实现泄漏气体的非接触、远距离遥感探测,非常适合易燃易爆及有毒有害气体的泄漏检测^[1]。因此,开展基于TDLAS技术的激光甲烷遥测仪的研究和开发具有重要的现实意义。现阶段,激光甲烷遥测仪主要分为两大类,手持式和云台式。针对检测面积大、全天候无死角的立体检测,云台式激光甲烷遥测仪优势明显。2021年,LU等^[5]提出了一种基于TDLAS技术的工业生产过程氨气泄漏遥感检测系统,该系统为了快速扫描氨气的吸收线,放弃了传统的“三角波+正弦波”的波长调制方案,采用了“波长锁定”方案;2021年,ZHANG等^[6]研发了一种基于光谱技术的紧凑型全量程甲烷微型探测器,该探测器结合了直接吸收光谱技术和波长调制光谱技术(wavelength modulation spectroscopy, WMS)的优点,根据检测浓度的选定变化点进行方法的切换;2020年,李金义等^[2]研制了非合作目

标TDLAS室内CO₂遥测系统,通过直流信号归一化WMS二次谐波信号的方法,消除光强变化的影响。利用该信号过零点间距与谱线压力加宽的关系,校正了开放光路中压强变化对浓度测量的影响;2021年,赵成龙等^[1]研制了一套基于TDLAS技术的开放型CO₂检测系统,该系统采用窄线宽、边模抑制高的分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB),并把二次谐波信号幅值作为浓度反演的信号;美国汉斯公司和上海禾赛公司的云台式激光甲烷遥测仪的检测误差为 $\pm 10\%$;大连艾科公司的云台式激光甲烷遥测仪的检测误差为 $\pm 20\%$ 。目前,遥测系统普遍存在检测误差大、精确度低、抗干扰能力弱等问题,大大限制了其广泛应用。针对上述问题,本文基于TDLAS技术利用MATLAB的simulink模块建立了一套甲烷积分浓度遥测仿真系统,系统采用谐波检测技术提取谐波信号。将二次谐波信号与一次谐波信号的峰值比值作为检测对象,用于消除对测量结果产生的影响因素^[7]。对影响遥测仪测量结果的激光调制参数进行了仿真分析和研究。此外,确定了系统对甲烷气体积分浓度检测的线性范围,并进行了积分浓度反演和测量误差分析,并将仿真结果应用于遥测系统,该系统的误差缩小为 $-4.68\% \sim -2.45\%$ 。采用Allan方差分析遥测系统的检测限和稳定性,结果表明,系统最佳积分时间为345 s,对应最低检测限为 $6.27 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ 。

1 云台式激光甲烷遥测仪工作原理和系统组成

1.1 遥测仪工作原理

系统将WMS和TDLAS技术相结合^[1,2]对甲烷气体进行探测,其工作原理如下。

激光器发射光强的瞬时频率 $\nu(t)$ 如式(1)所示:

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(\omega t), \quad (1)$$

式中, t 是时间, $\bar{\nu}$ 是中心频率, a 是调幅。由于工作电流对激光器进行强度调制,并且非线性调制幅度可以忽略不计,因此,激光器的强度输出应为线性调制,如式(2)所示:

$$I_0(t) = \bar{I}_0[1 + i_1 \cos(\omega t + \phi_1)], \quad (2)$$

式中, $\bar{I}_0$ 表示为平均强度, i_1 是 $\bar{I}_0$ 归一化的线强调制度, ϕ_1 为线性调制相移。

当激光射入甲烷气体时,根据朗伯-比尔定律的原理^[7],且 $a(\nu)L < 0.05$,入射光强 I_t 如式(3)所示:

$$I_t = \eta I_0 \exp(-a(\nu)L) \approx \eta I_0 (1 - a(\nu)L) = \eta I_0 (1 - PX_{\text{CH}_4} L S_{\text{CH}_4} \phi_{\text{CH}_4}), \quad (3)$$

式中, $a(\nu)$ 表示甲烷气体的吸收系数(cm^{-1}), L 是光程长度(cm), $a(\nu)L$ 为吸收度, η 是非合作目标的反射率, P 是气体压强(atm) ($1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), X_{CH_4} 是 CH_4 气体的浓度(ppm), S_{CH_4} 为线强($\text{atm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$), ϕ_{CH_4} 为线型函数(cm)。式(3)中的 $a(\nu)$ 是 $\nu(t)$ 的函数,其傅里叶级数展开可得式(4):

$$a(\bar{\nu} + a \cos(\omega t)) \times L = \sum_{n=0}^{\infty} H_n \cos(n\omega t), \quad (4)$$

式中, H_n 表示 $a(\nu)$ 的第 n 阶傅里叶展开系数。式(4)中的 n 次谐波分量如式(5)所示:

$$H_n(\bar{\nu}, a) = \frac{PX_{\text{CH}_4} L}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum S_{\text{CH}_4} \phi_{\text{CH}_4} \times (\bar{\nu} + a \cos(\omega t)) \times \cos(n\omega t) d\omega t \quad (n > 0)。 \quad (5)$$

由式(5)可得, H_n 的幅值与 $X_{\text{CH}_4} L$ 成正比。在气体遥测时需要使用自然环境作为非合作目标(例如,建筑物、墙体和树木等自然物),而不同目标的反射率是不同的。采用 WMS 技术和归一化二次谐波信号的方式解决目标反射率对测量结果产生影响的问题^[7]。目前,对于谐波信号的提取,大部分采用锁相放大器的方式。通过使用正余弦信号同时解调探测信号,减少探测信号和参考信号之间的相位差对信号测量的干扰。解调过程中得到 n 次谐波的两个分量,分别为 Y 和 X 。二次谐波 S_{2f} 信号的幅值如式(6)所示:

$$S_{2f} = [X_{2f}^2 + Y_{2f}^2]^{1/2} = \frac{\eta \bar{I}_0}{2} \left\{ \left[H_2 + \frac{i_1}{2} (H_1 + H_3) \cos \phi_1 \right]^2 + \left[\frac{i_1}{2} (H_1 - H_3) \sin \phi_1 \right]^2 \right\}。 \quad (6)$$

由于吸收峰到两侧的距离相同,故式(6)可简化为式(7):

$$S_{2f} = \frac{\eta \bar{I}_0}{2} H_2(0)。 \quad (7)$$

对于痕量气体浓度,有 $1 \gg H_n$,同理可得一次谐波信号 S_{1f} 的幅值如式(8)所示:

$$S_{1f} = \frac{\eta \bar{I}_0}{2} i_1。 \quad (8)$$

用一次谐波信号 S_{1f} 归一化二次谐波信号 S_{2f} ,可得式(9):

$$S_{2f}/S_{1f} = \frac{H_2}{i_1} = \frac{PX_{\text{CH}_4} L S_{\text{CH}_4}}{\pi i_1} \times \int_{-\pi}^{\pi} \phi_{\text{CH}_4} (\bar{\nu} + a \cos(\omega t)) \cos(2\omega t) d\omega t。 \quad (9)$$

由式(9)可知, S_{2f}/S_{1f} 解决了 I_0 和 η 在测量结果中的干扰^[8]。

1.2 遥测仪系统组成

基于 TDLAS 的激光甲烷遥测仪主要由光学遥测组件(DFB、参考气室、光电探测器、菲涅尔镜、反光镜、分束器)和解调一体化模块(FPGA+ARM 嵌入式、激光驱动器、前置放大器)2 部分组成。遥测仪的工作过程为,使用 TEC 驱动芯片控制激光二极管的温度,并专门设计信号产生电路产生扫描信号(低锯齿波)+调制信号(高频正弦波),使得激光二极管发出一定波长范围的近红外光,经过分束器后,一部分发射光通过参考气室,进行甲烷气体的波长锁定后,使得发光光谱覆盖甲烷气体在近红外的特征吸收峰。另一部分发射光,再通过甲烷气体后被非合作目标反射,之后被收发一体光学遥测组件接收、聚焦于近红外光电探测器探测,光电探测器输出一定频率的光电压。最后,由微控制器、滤波处理、相应解调算法分析得到谐波探测信号。其工作原理图如图 1 所示。图 2 为遥测系统核心模块,其中,图 2(a)为收发一体激光光学遥测组件;图 2(b)为 FPGA+ARM 嵌入式激光调制、信号采集、处理和浓度解调一体化模块;图 2(c)为遥测组件和解调一体化模块连接图。

2 基于 TDLAS-WMS 的激光遥测系统仿真建模

本文的 TDLAS 仿真系统利用 MATLAB 的 simulink 软件进行全过程建模^[4]。该系统主要由激光输出模块、模拟外部环境、谐波检测模块组成。图 3 为系统设计图。

2.1 激光输出模块

使用直流分量和余弦波合成信号作为激光器的波长调制^[3]。在激光器被波长调制后,输出的波数和光强如式(10)、(11)所示:

$$V(t) = V_c + \Delta V \text{sawtooth} + \Delta V \cos(2\pi f t), \quad (10)$$

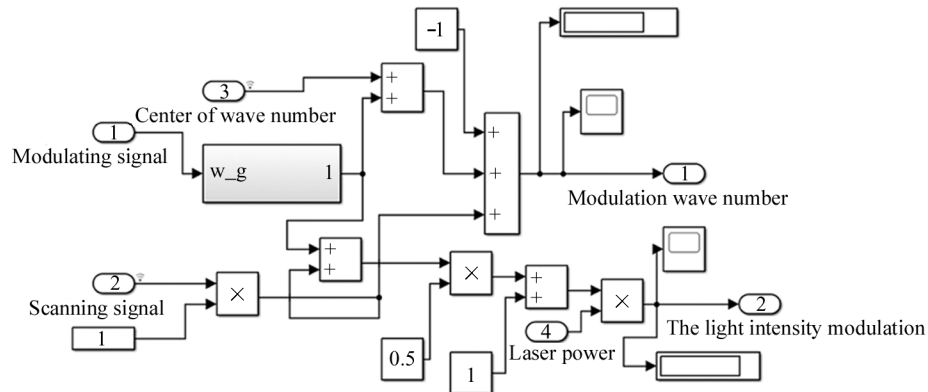


图4 激光输出模块设计图

Fig. 4 Design diagram of laser output module

2.2 模拟外部环境

激光器经过调制后会产生一束具有特定中心波数的激光光束,光束经过具有甲烷气体的环境后,根据特定吸收谱线产生吸收信号,使得入射的光强发生明显的改变,入射光经过光电转换器后会产生电压信号,电压信号与入射的光强成正比。目前,吸收谱线主要有3种,洛伦兹线型、高斯线型、伏格特线

型^[10,11]。本实验选用洛伦兹线型,式(12)为吸收谱线的描述公式:

$$g(V_t, V_0) = \frac{\Delta V_{\text{line}}}{\pi} \frac{1}{(\Delta V_{\text{line}})^2 + (V_t - V_c)^2} \quad (12)$$

根据该公式结合朗伯-比尔定律可设计出模拟外部环境的模块,如图5所示。

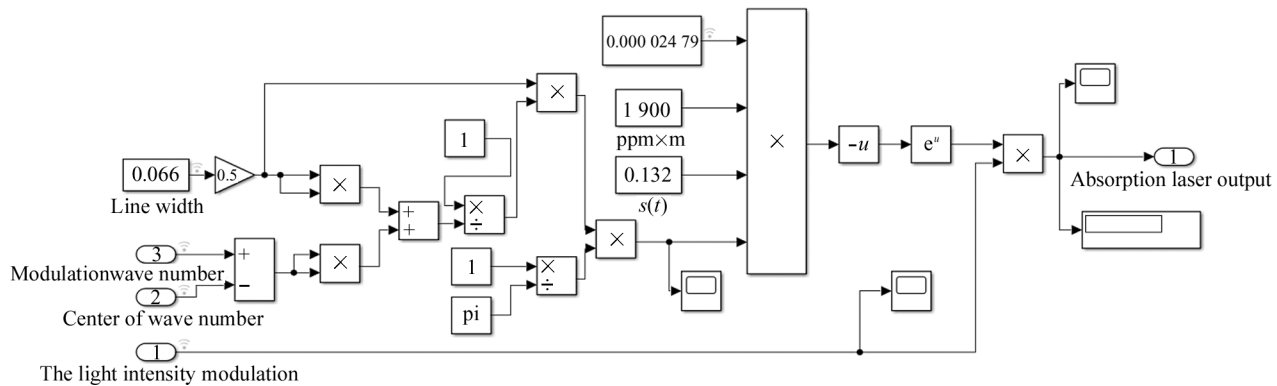


图5 模拟外部环境的模块设计图

Fig. 5 Design diagram of simulated external environment module

2.3 谐波检测模块

采用锁相放大器的工作原理,对通过甲烷气体的穿透光和吸收光的光强幅值进行谐波检测^[11]。一次谐波可表示为式(13):

$$F(t)_{1f} = \sqrt{X(t)_{1f}^2 + Y(t)_{1f}^2}, \quad (13)$$

式中, $X(t)_{1f}$ 和 $Y(t)_{1f}$ 用式(14)、(15)表示:

$$X(t)_{1f} = [I_{\text{absorb}}(t) \times R(1f, 0)], \quad (14)$$

$$Y(t)_{1f} = [I_{\text{absorb}}(t) \times R(1f, \frac{\pi}{2})], \quad (15)$$

式中, $R(1f, 0)$ 表示输入调制的余弦波频率相同且相位差为零的参考信号。同理可得二次谐波公式。图6为模拟谐波检测模块框图,图7为模拟谐波检测

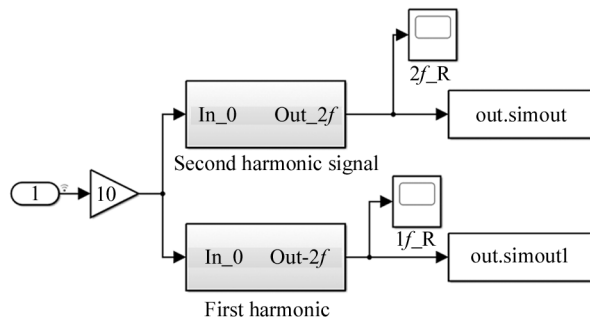


图6 模拟谐波检测模块框图

Fig. 6 Block diagram of analog harmonic detection module

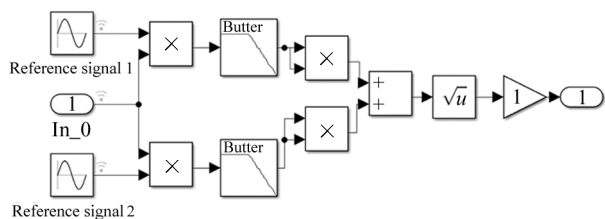


图7 模拟谐波检测子模块设计图

Fig. 7 Design diagram of simulated harmonic detection submodule

子模块设计图,只需要对子模块设置不同的参考信号值,即可解调出的一次谐波信号和二次谐波信号,如图8所示。图8为谐波示意图,当参考信号1和2设置为6000 Hz时,子模块解调出一次谐波信号,即图中的 $1f$ 信号。参考信号1和2设置为12000 Hz时,子模块解调二次谐波信号即图中 $2f$ 信号。

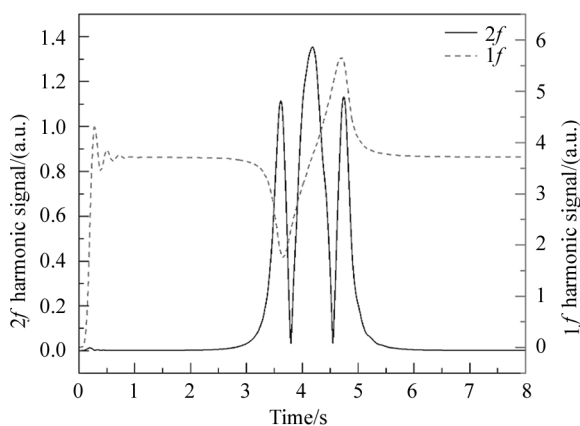


图8 模拟谐波示意图

Fig. 8 Schematic diagram of simulated harmonics

3 系统遥测仿真实验与分析

根据数学模型对甲烷气体遥测的各环节进行仿真。调制参数的选择会改变吸收信号的精度^[10],对仿真模型进行不同的调制参数实验,分析其与各谐波信号的关系。选取最佳调制参数,最终将测得数据用数学公式拟合确定系统的误差范围,此过程对云台式甲烷遥测仪缩小误差、提高精度具有重要的意义。选取甲烷作为目标气体,则激光中心波数为 6046.72 cm^{-1} ,设定激光器工作功率为 10.24 mW 。在HITRAN2020^[12,13]中,筛选出甲烷在温度为300、压力为1 atm条件下的 $S(T)$ 和 ΔV_{line} ,并加载到系统仿真模型中。

3.1 激光器调制参数仿真优化

激光器的调制参数由调制频率、调制深度、扫描幅度和扫描频率组成。其中,调制频率和调制深度

是TDLAS技术频率调制光谱和WMS的区别所在。WMS与频率调制相比,WMS的调制幅度更大一些,但频率范围较小,频率范围在kHz,比较容易实现且成本相对较低。WMS在云台式甲烷遥测仪上的优势更为明显,因此本节将针对仿真系统进行调制深度和kHz的正弦波频率对谐波信号的影响^[4,9]研究。

2.1.1 调制深度对二次谐波和归一化二次谐波信号的影响

在WMS技术中,一次谐波和二次谐波的波形是由锯齿波和正弦波共同决定的,因此,调教系统时,需要寻找一个适当的波形^[10]。定义调制系数 m 如式(16)所示:

$$m = \frac{\Delta V}{\Delta V_{\text{line}}}, \quad (16)$$

式中, ΔV_{line} 是谱线的半高全宽度(cm^{-1})。分析调制系数与谐波信号的关系,寻找显著的谐波信号,有利于测量积分浓度。在系统仿真过程中,当调制系数 m 为0.5、1、2、2.2、3和4时,绘制二次谐波信号和一次谐波信号图,如图9和10所示。从图9和10可以

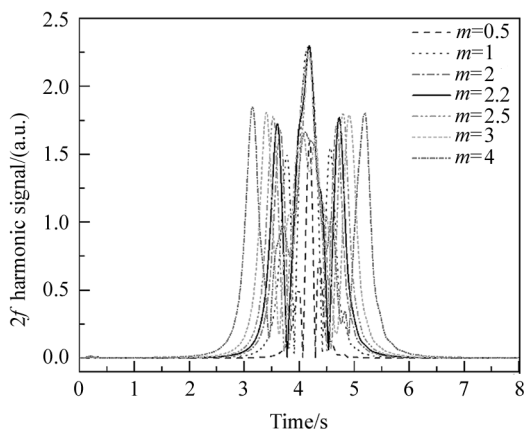


图9 二次谐波信号图

Fig. 9 Second harmonic signal diagram

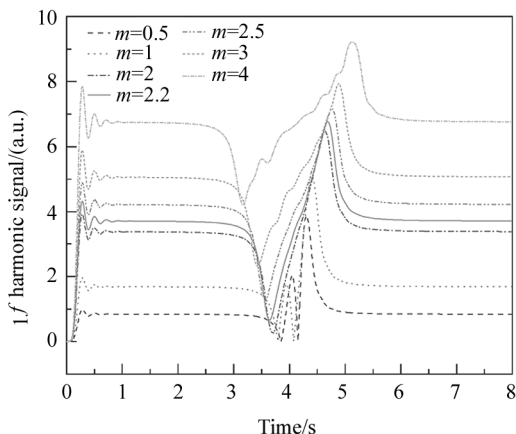


图10 一次谐波信号图

Fig. 10 First harmonic signal diagram

看出,调制系数 m 与二次谐波信号和一次谐波信号都有直接的关系。随着 m 的增加,二次谐波的峰值愈加提升,峰值与两个低峰之间有明显距离差,呈现非对称性,对测量造成干扰。当 m 超过 3 时,二次谐波的峰值逐渐低于两个低峰值。一次谐波的峰值随着 m 的增大一直变大,但在 m 小于 2 时表现出来的图形并非标准一次谐波图像,当 $m=2.2$ 时, $2f/1f$ 的峰值达到最大。因此,当 $m=2.2$ 时,吸收信号最为显著。

3.1.2 正弦波频率对二次谐波和归一化二次谐波信号的影响

设置正弦调制频率分别为 2 kHz、3 kHz、4 kHz、5 kHz、6 kHz、8 kHz 和 9 kHz。不同频率对一次谐波、二次谐波和归一化二次谐波影响图形如图 11 所示。如图所示,正弦波调制频率的变化对归一化二次谐波峰值的影响较小。因此,正弦信号的频率选取可以在 2—9 kHz。

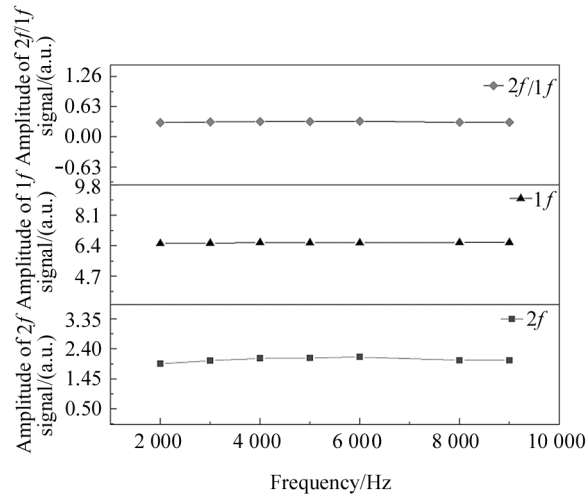


图 11 不同频率对谐波影响图

Fig. 11 Influence of different frequencies on harmonics

3.2 遥测系统标定和反演误差仿真实验分析

3.2.1 系统测量范围分析

仿真实验中测量了 0—10 000 ppm·m 范围内的 $2f/1f$ 信号点,如图 12 所示。图 12 中利用仿真模型测得不同浓度下的信号峰值。分别对 0—2 000 ppm·m 和 0—2 700 ppm·m 积分浓度范围内的采样点进行线性拟合,拟合结果显示前者的 R^2 为 0.993,优于后者的 0.988。在 0—2 000 ppm·m 积分浓度范围内线性度更好,超过此量程将出现非线性现象^[13],将对云台式甲烷激光遥测仪的测量精度产生影响。

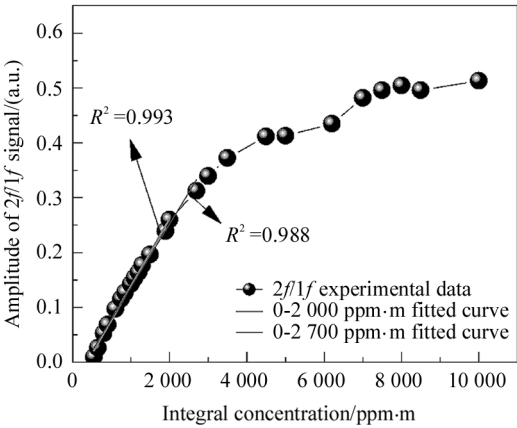


图 12 甲烷积分浓度量程范围图

Fig. 12 Diagram of methane integral concentration range

3.2.2 遥测系统标定实验

本实验的积分浓度标定方案采用峰值拟合法^[7],其中用 $2f$ 峰值比 $1f$ 峰值表示 $2f/1f$ 信号的峰值。利用积分浓度和 $2f/1f$ 信号的关系进行反演。在常温常压下,气体的积分浓度与 $2f/1f$ 信号成正比。对云台式甲烷遥测仪的标定,通常是在线性区域进行,因此在 0—2 000 ppm·m 范围内测得拟合数据如表 1 所示。

表 1 不同积分浓度对应的峰值信号
Tab. 1 Peak signals corresponding to different integral concentrations

Methane integral concentration/ (ppm·m)	Amplitude of $2f/1f$ Signal/ (a. u.)
150	0.026
300	0.052
400	0.068
600	0.097
750	0.115
860	0.127
1000	0.143
1100	0.153
1200	0.164
1300	0.177
1500	0.196
1900	0.239
2000	0.260

采用最小二乘法^[10]得到的拟合公式,如式(17)所示:

$$Y = 8350.730X - 163.173, \quad (17)$$

式中, Y 表示积分浓度, X 表示 $2f/1f$ 的峰值。绘图如图 13 所示。

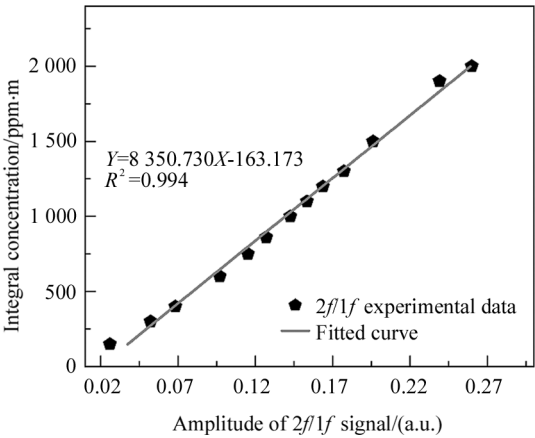


图 13 归一化二次谐波的峰值拟合图
Fig. 13 Peak fitting diagram of the normalized second harmonic

如图 13 所示,在 0—2 000 ppm · m 积分浓度范围内,选取 13 个点进行数据拟合,得到 $R^2 = 0.994$ 拥有较好的线性相关性。

3.2.3 浓度反演实验及测量误差分析

采用拟合曲线和插值法来检测未知浓度^[7]。分别设定气积分浓度为 360 ppm · m、440 ppm · m、900 ppm · m、1 050 ppm · m、1 170 ppm · m、1 340 ppm · m、1 450 ppm · m、1 600 ppm · m、1 800 ppm · m 和 1 950 ppm · m 的甲烷气体输入到仿真系统中,测量与反演结果如表 2 所示。

表 2 反演气积分浓度及误差

Tab. 2 Inversion of gas integral concentration and error		
Standard integral concentration / (ppm · m)	Measuring integral concentration / (ppm · m)	Relative error / %
360	353.74	-1.94
440	457.30	3.93
900	936.61	4.06
1 050	1 074.40	2.32
1 170	1 177.95	0.67
1 340	1 319.08	-1.56
1 450	1 433.48	-1.13
1 600	1 552.06	-2.99
1 800	1 739.95	-3.33
1 950	1 880.25	-3.57

如图 14 所示,根据表 2 所得甲烷积分浓度反演误差图。

如图 14 所示,采用了 0—2 000 ppm · m 量程范围内 10 组数据进行浓度反演,得到拟合公式如式(18)所示:

$$Y' = 1.056Y - 53.643, \quad (18)$$

式中,Y 为标准积分浓度,Y'为反演积分浓度,其斜率

为 1.056 接近于 1,线性相关性 R^2 为 0.998,2f/1f 信号的峰值反演得到的积分浓度误差在 -3.57%—4.06% 范围内。

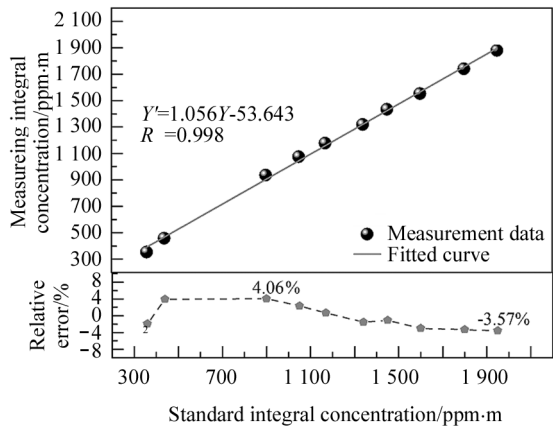


图 14 甲烷积分浓度反演误差图
Fig. 14 Inversion error diagram of methane integral concentration

3.3 遥测系统实验研究与分析

根据仿真结果显示,参量的选择对云台式激光甲烷遥测仪的精度有较大的影响。由仿真实验数据对云台式激光甲烷遥测仪进行参数调整并进行相关的测量实验和误差分析。搭建的实验环境如图 15 所示。

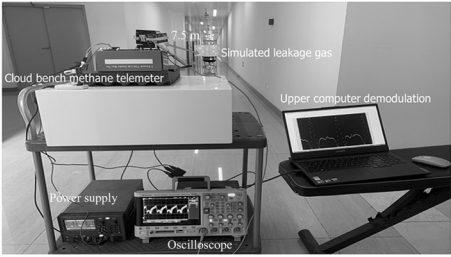


图 15 实验测量图
Fig. 15 Experimental survey diagram

3.3.1 云台式激光甲烷遥测仪标定实验与分析

根据仿真结果,设定遥测仪的调制系数 $m = 2.2$,正弦波调制频率为 6 kHz,在常温常压的条件下对 0—26 000 ppm · m 内的积分浓度进行测量,再对 0—2 000 ppm · m 积分浓度范围内进行线性拟合,得到拟合公式(19)所示:

$$Y = 10 269.017X - 111.419, \quad (19)$$

式中, $R^2 = 0.999$ 拥有较好的线性度,在此范围内进行测量时误差较小。超过此范围,仪器将会出现非线性情况,误差较大。实验结果如图 16 所示。

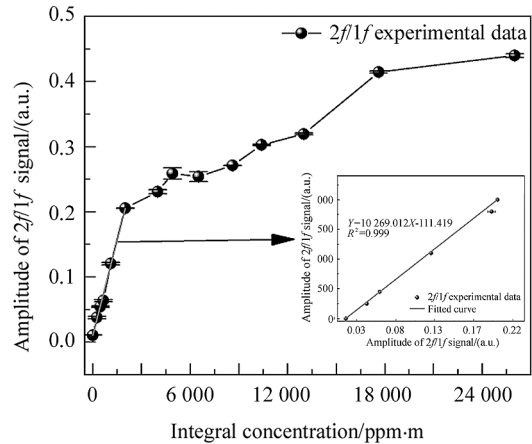


图 16 实测甲烷积分浓度量程范围图
Fig. 16 Actual measurement methane integral concentration range

3.3.2 云台式激光甲烷遥测仪浓度反演与误差分析

实验在 0—2 000 ppm·m 范围内进行浓度反演。分别取积分浓度为 400 ppm·m、500 ppm·m、800 ppm·m、1 300 ppm·m、1 650 ppm·m 和 1 900 ppm·m 的甲烷气袋放置在 7.5 m 处,每个气袋进行 6 min 测量。测量结果和对应的测量误差如表 3 所示。

表 3 实测反演气体积分浓度及误差
Tab. 3 Actual measurement inversion of gas integral concentration and error

Standard integral concentration/ (ppm·m)	Measuring integral concentration/ (ppm·m)	Relative error/ (%)
400	409.80	2.45
500	476.58	-4.68
800	798.79	-0.15
1 300	1 289.57	-0.80
1 650	1 638.57	-0.69
1 900	1 850.76	-2.59

如图 17 所示,根据表 3 得到的实测积分浓度反演误差图。
如图所示,在 0—2 000 ppm·m 积分范围内选取 6 组数据进行浓度反演,其中 $R^2=0.999$,误差范围在 -4.68%—2.45%,与市场上云台式激光甲烷遥测仪 $\pm 10\%$ 和 $\pm 20\%$ 的误差有显著的提升,大大提高了系统的检测精度。

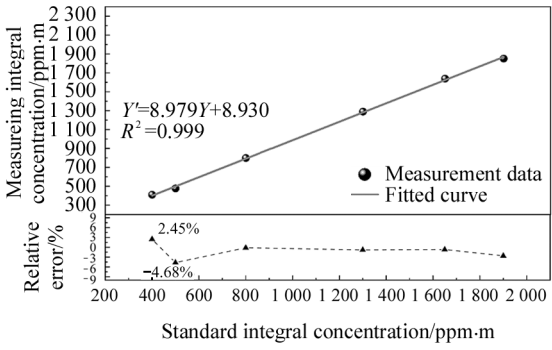
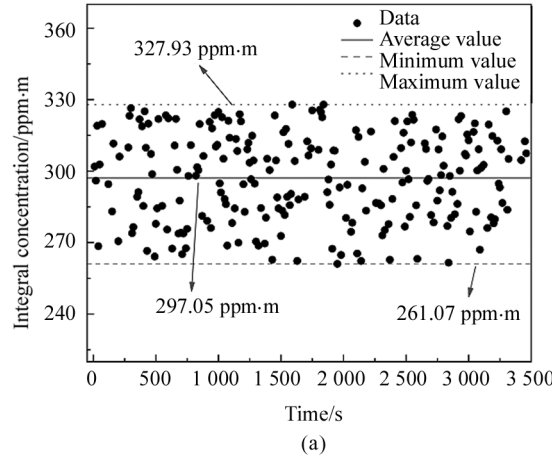


图 17 实测甲烷积分浓度反演误差图
Fig. 17 Actual measurement inversion error of methane integral concentration

3.3.3 云台式激光甲烷遥测仪系统稳定性和检测限评估

甲烷遥测系统稳定性和检测限评估实验以室内白色墙面为非合作目标,采用标准浓度为 300 ppm·m 的 CH₄ 气袋,气袋紧贴室内白色墙面,甲烷遥测系统距室内白色墙面的距离为 5 m,系统积分时间设置为 5 s,连续测量 30 min。测量结果如图 18(a)所示,整个测量期间,系统测量的浓度在 261.07—327.93 ppm·m 范围内波动,测量的平均浓度为 297.05 ppm·m,标准差为 37.85 ppm·m (1 σ),波动是由系统内部噪声和外部环境变化产生的背景噪声引起的。对测量结果进行 Allan 方差分析^[14-16],如图 18(b)所示,反映了系统检测限随积分时间的变化关系。结果表明,系统在 5 s 积分时间内的检测下限为 37.85 ppm·m,最佳积分时间为 345 s,对应的检测下限为 6.27 ppm·m。当积分时间超过 345 s 时,慢变噪声在测量结果中占主导地位,开始影响检测精度。同时,当积分时间在 290 s 内时,Allan 方差减小的趋势与 $1/\sqrt{\tau}$ 基本相同,此时热噪声在测量结果中



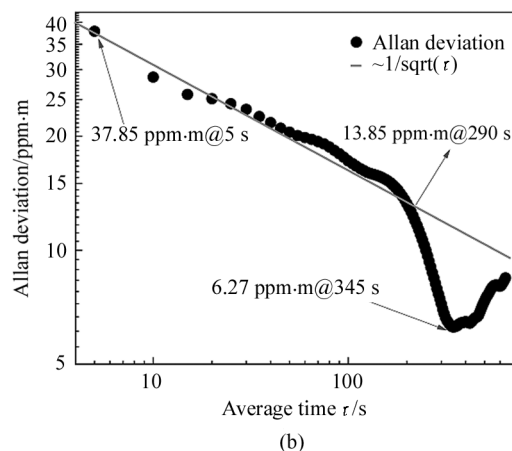


图 18 系统稳定性和检测限评估:

(a) 系统稳定性测量实验; (b) Allan 方差分析

Fig. 18 System stability and detection limit evaluation;

(a) The stability test of the system;

(b) Allan deviation analysis

占主要部分。当积分时间达到 300 s 时,增加积分时间不能进一步提高检测精度,此时波长波动噪声是主要的干扰^[5]。

4 结 论

本文根据 TDLAS 的 WMS 和归一化二次谐波技术原理,利用 MATLAB 的 simulink 软件模块,构建了一个非合作、非接触的甲烷气体浓度检测模型。利用该模型分析了影响遥测系统的主要因素,在选取最佳参数后,对测量浓度—探测信号数据进行拟合标定处理,并进行积分浓度反演和误差分析,结果显示,系统误差在 $\pm 4.06\%$ 以内。依据该模型各部分的参数,对云台式激光甲烷遥测仪进行参数设置并进行了标定、反演误差、系统稳定性和检测限实验,结果表明,云台式甲烷遥测仪反演误差在 $-4.68\% \sim 2.45\%$ 内与仿真实验结果相一致,系统稳定性较好,与市场上现有设备相比,精度有了显著的提高并且抗干扰能力也有所增强。本文研究结果对高精度云台式甲烷遥测仪的参数选取和精度提高具有重要的指导意义,同时也可以通过改变仿真系统的中心波数,实现对其他气体浓度的测量研究。

参考文献:

[1] ZHAO C L, HUANG D F, LIU Z Y, et al. Measurement of trace CO_2 concentration with open-path TDLAS-WMS technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 51(2): 0230001.

赵成龙, 黄丹飞, 刘智颖, 等. 开放型 TDLAS-WMS 技术 CO_2 痕量气体检测[J]. 光子学报, 2021, 51(2): 0230001.

- [2] LI J Y, FAN H Q, YU Z W, et al. Standoff detection of indoor CO_2 using TDLAS with non-cooperative targets[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 229-236.
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): 230-234.
- [3] LIU S. Research on trace gas detection technology based on $2f/1f$ wavelength modulated spectrum[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 5-8.
刘帅. 基于 $2f/1f$ 波长调制光谱的微量气体检测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 5-8.
- [4] WANG L L, JIA M. Simulation and analysis of second harmonic signal gas detection based on TDLAS technology[J]. Laser Journal, 2020, 41(3): 25-28.
王琳琳, 贾明. TDLAS 技术气体检测二次谐波信号的仿真与分析[J]. 激光杂志, 2020, 41(3): 25-28.
- [5] LU H B, ZHENG C, ZHANG L, et al. A remote sensor system based on TDLAS technique for ammonia leakage monitoring[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(7): 2248.
- [6] 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.
- [7] 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.
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.
- [8] LI J Y, LUO G, DU Z H, et al. Hollow waveguide enhanced dimethyl sulfide sensor based on a 3.3 mm interband cascade laser[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 255(Pt. 3): 3550-3557.
- [9] WANG Z M. Simulation and analysis of CH_4 concentration measurement based on mid-infrared laser absorption spectrum[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Geosciences, 2020: 4-20.
王志敏. 基于中红外激光吸收光谱的 CH_4 浓度测量仿真与分析[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2020: 4-20.
- [10] LV W J, LI H L, LI W Z, et al. Optimization and experimental research of modulation parameters of TDLAS technology[J]. Laser Technology, 2021, 45(3): 336-343.
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, 45(3): 336-343.

- [11] FAN H Q. Design of non-cooperative target carbon dioxide detection system based on TDLAS[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.

樊鸿清. 基于 TDLAS 的非合作目标二氧化碳检测系统设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.

- [12] YAN Y, DU Z H, LI J Y, et al. Absorption linewidth inversion with wavelength modulation spectroscopy[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(2): 372-377.

- [13] LI J Y, QIAO C Z, SONG L M, et al. Transient emission wavelength estimation for DFB laser with temperature tuning[J]. Optoelectronics Letters, 2017, 13(2): 108-112.

- [14] ZHENG K, ZHENG C, YAO D, et al. A near-infrared C_2H_2 / CH_4 dual-gas sensor system combining off-axis integrated-cavity output spectroscopy and frequency-division-

multiplexing-based wavelength modulation spectroscopy[J]. The Analyst, 2019, 144(6): 2003-2010.

- [15] ZOU M L, SUN L Q, WANG X. CH_4/C_2H_6 dual-gas sensing system based on wavelength modulation spectroscopy using a single near infrared laser[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 272: 2-6.

- [16] WANG G S, MEI J X, TIAN X, et al. Laser frequency locking and intensity normalization in wavelength modulation spectroscopy for sensitive gas sensing[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5-7.

作者简介:

程 跃 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为激光气体探测和光纤传感技术.