

涉氢装备氢气泄漏激光遥测系统光电参数优化分析

赵美琪 周围 王迪 吕妍 李玉爽 濮御 李栋 冯其栋 陈淑贤 罗郎

Optimization analysis of optoelectronic parameters of laser telemetry systems for hydrogen leakage detection in hydrogen-involved equipment

ZHAO Meiqi, ZHOU Wei, WANG Di, LYU Yan, LI Yushuang, PU Yu, LI Dong, FENG Qidong, CHEN Shuxian, LUO Yilang

引用本文:

赵美琪,周围,王迪,等.涉氢装备氢气泄漏激光遥测系统光电参数优化分析[J].*应用光学*,2024,45(6): 1219–1227. DOI: 10.5768/JAO202445.0603002

ZHAO Meiqi, ZHOU Wei, WANG Di, et al. Optimization analysis of optoelectronic parameters of laser telemetry systems for hydrogen leakage detection in hydrogen-involved equipment[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(6): 1219–1227. DOI: 10.5768/JAO202445.0603002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于吸收光谱法的CO₂正压测量技术分析](#)

CO₂ positive pressure measurement technology based on absorption spectroscopy

应用光学. 2022, 43(1): 106–110 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0103006>

[自适应光学系统迭代控制算法超参数优化](#)

Hyper-parameter optimization of iterative control algorithms for adaptive optical systems

应用光学. 2024, 45(1): 126–133 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102007>

[光谱分频型PV/T系统中纳米颗粒优化分析](#)

Optimization analysis of nanoparticles for spectral beam splitting hybrid PV/T system

应用光学. 2023, 44(4): 699–710 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401001>

[高精度激光告警参数提取算法](#)

High-precision parameter extraction algorithm of laser alarm

应用光学. 2023, 44(6): 1258–1264 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610013>

[探测器像元尺寸对航空光电系统成像性能影响分析](#)

Influence of detector pixel size on imaging performance of airborne optoelectronic system

应用光学. 2022, 43(4): 583–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401001>

[高精度二维宽波段激光告警参数计算算法](#)

Calculation algorithm of high-precision two-dimensional broadband laser warning parameters

应用光学. 2022, 43(1): 111–118 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0107001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1219-09

涉氢装备氢气泄漏激光遥测系统光电参数优化分析

赵美琪^{1,2,3}, 周 围^{1,2,3}, 王 迪^{2,3,4}, 吕 妍^{1,2,3}, 李玉爽^{1,2,3}, 潘 御^{2,3,4}, 李 栋^{2,3,4},
冯其栋⁵, 陈淑贤⁵, 罗义郎⁵

(1. 东北石油大学 物理与电子工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学 低碳与新能源关系研究发展国际联合实验室,
黑龙江 大庆 163318; 3. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 4. 东北石油大学
土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 5. 杭州杭燃工程科技有限公司, 浙江 杭州 310008)

摘要: 在氢气泄漏的场景中, 人员可能面临火灾、爆炸和窒息等极大危险。为了检测时有效降低人员的暴露风险, 实时监测氢气浓度, 研发了一套基于开放光路下的可调谐二极管激光吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术结合波长调制光谱 (wavelength modulation system, WMS) 技术的氢气遥测系统, 利用 MATLAB 可视化建模仿真软件 Simulink 实现了对该系统的仿真建模。为进一步提高系统的检测精度和信噪比, 对比分析激光扫描参数对二次谐波信号波形的影响, 以及不同菲涅尔透镜 F 数对探测器接收光强的影响情况, 并结合波形的峰值、峰宽、信噪比和信号的完整性等评估指标得到最佳参数值。结果表明: 扫描幅度为 1 V, 扫描频率为 10 Hz 下的波形最佳。参数优化后, 以木板、石灰、塑料、铝板为非合作目标可实现的最远探测单程距离分别从 1.8 m、2.4 m、4 m 和 6 m 提升至 2 m、2.8 m、5.1 m 和 10 m, 系统激光回波入射功率也有显著提高。该氢气检测系统具有使用环境更广泛、检测环境更安全、检测精度更高的特点。该研究为实际测量中相关参数的选取提供了理论依据, 对改善实际应用中的系统测量精度提供了理论指导。

关键词: 氢气遥测; 可调谐二极管激光吸收光谱; Simulink; 调制参数

中图分类号: TN247; O433.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0603002

Optimization analysis of optoelectronic parameters of laser telemetry systems for hydrogen leakage detection in hydrogen-involved equipment

ZHAO Meiqi^{1,2,3}, ZHOU Wei^{1,2,3}, WANG Di^{2,3,4}, LYU Yan^{1,2,3}, LI Yushuang^{1,2,3}, PU Yu^{2,3,4},
LI Dong^{2,3,4}, FENG Qidong⁵, CHEN Shuxian⁵, LUO Yilang⁵

(1. School of Physics and Electronic Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;
2. International Joint Laboratory on Low-Carbon and New-Energy Nexus, Northeast Petroleum University,
Daqing 163318, China; 3. National Key Laboratory of Multi-Resource Collaboration for Green Extraction
of Onshore Shale Oil, Daqing 163318, China; 4. School of Architecture and Civil Engineering,
Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 5. Hangzhou Hangran
Engineering Technology Co.,Ltd., Hangzhou 310008, China)

Abstract: In the scenario of hydrogen leakage, personnel may be exposed to great dangers such as fire, explosion and asphyxiation. In order to effectively reduce the risk of personnel exposure during detection and to monitor hydrogen concentrations in real time, a hydrogen telemetry system based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology under an open light path combined with wavelength modulation

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2024-02-06

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划 (GZB20240137); 国家市场监督管理总局科技计划项目 (2023MK163); 黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目 (2023ZXJ06A04)

作者简介: 赵美琪 (2000—), 女, 硕士, 主要从事危险介质激光光谱检测研究。E-mail: meiqiuuu@163.com

通信作者: 周围 (1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事多相流含油率红外光谱定量检测及识别方法的研究。

E-mail: aroundwei@163.com

王迪 (1992—), 男, 博士, 主要从事危险气体激光检测系统研究。E-mail: wangdinepu@163.com

system (WMS) technology was developed, in which the simulation modeling was realized by using MATLAB visual modeling and simulation software Simulink. To further improve the detection accuracy and signal-to-noise ratio of the system, the influence of laser scanning parameters on the second-harmonic signal waveform and the influence of different Fresnel lens F numbers on the light intensity received by the detector were comparatively analyzed, and the optimal parameter value was obtained by combining the peak value, peak width, signal-to-noise ratio and signal integrity of the waveform. The results show that the waveform is optimal with the scanning amplitude of 1 V and the scanning frequency of 10 Hz. After parameters optimization, the maximum detection distance of wood board, lime, plastic, and aluminum plate as non-cooperative targets is increased from 1.8 m, 2.4 m, 4 m and 6 m to 2 m, 2.8 m, 5.1 m and 10 m respectively, and the laser-echo incident power of the system is also significantly improved. The hydrogen detection system has the characteristics of wider operating environment, safer detection environment and higher detection accuracy. This research serves as a theoretical foundation for the selection of relevant parameters in practical measurement, and provides theoretical guidance for enhancing the accuracy of system measurement in practical applications.

Key words: hydrogen telemetry; tunable diode laser absorption spectroscopy; Simulink; modulation parameters

引言

氢能是一种清洁高效的可再生资源,具有零污染、零碳、能量密度大等优点,是21世纪重要的储能载体之一^[1-2]。氢分子较小,在生产运输过程中易发生泄漏,存在爆炸的隐患。开展氢气泄漏检测技术研究是氢气工业生产、运输、存储流程的重要保障。在氢气泄漏检测领域,传统的检测方式包括半导体传感器检测^[3]、电化学检测^[4]、催化燃烧检测^[5]等,其存在功耗高、稳定性差、易受环境干扰、精度低且需要近距离接触泄漏气体等缺点。因此,研发一种能够精准检测氢气泄漏并及时预警的高稳定氢气遥测系统,是氢能生产储运安全防护的重大需求。

傅里叶变换红外(Fourier transform infrared, FTIR)光谱^[6]和差分激光雷达(differential absorption lidar, DIAL)^[7]等开路光谱技术已广泛应用于危险气体遥测。然而,FTIR的宽带光源限制了其光谱分辨率,从而降低了气体检测的灵敏度。与此同时,DIAL系统的设计相对复杂,尤其是需要高质量和高功率的激光源作为关键组件。可调谐二极管激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术结合波长调制光谱(wavelength modulation system, WMS)技术具有非接触、选择性强、灵敏度高、响应速度快等优点,且具有高亮度的准直激光光源,允许光束在远距离传播^[8-10]。TDLAS-WMS技术因其在开放光路下进行氢气遥测,具有选择性好灵敏度高的优点,可用于测量与不断发展的现代工业应用相关的复杂混合物中的

选定目标气体。

在开放空间气体遥测中,激光遥测系统需要应对信号微弱与光噪声、不可控环境噪声干扰等因素的挑战。为了提高系统的测量准确度,研究者们提出了一些有价值的解决方案。例如,周振等人^[11]利用Simulink软件建立了一套甲烷积分浓度遥测仿真系统,并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,从而减小了系统误差。此外,刘东等人^[12]进行了吸收峰峰值拟合标定法和吸收峰积分面积拟合标定法的仿真试验。研究结果表明,该方法可以提高遥测系统的测量精度。然而,这种方法的检测结果过于依赖峰值的准确检测和拟合,如果峰值不明显或受到噪音干扰,可能导致不准确的测量结果。且在以上研究中,没有考虑到光学接收元件最优参数的选择,难以适应遥测距离的变化。

为了提高氢气激光遥测传感器在非合作目标场景下的远程探测稳定性,研发了一套基于TDLAS-WMS技术开放光路下的氢气泄漏遥测仿真系统,采用菲涅尔透镜作为光学接收模块,分析了菲涅尔透镜参数与激光回波功率的关系。利用Simulink软件搭建氢气检测系统仿真模型,利用Trace-Pro 7.4.3光学软件搭建系统检测光路仿真模型,以二次谐波的信噪比、峰值、峰宽作为评估参量,对该系统的光电参数进行优化以提高系统检测精度,可进一步提高工程场景适用性,并能避免检测人员与危险气体直接接触。

1 氢气遥测 TDLAS 系统设计

基于 MATLAB Simulink 仿真平台搭建了激光氢气遥测 TDLAS 系统, 如图 1 所示。利用锯齿波扫描信号叠加正弦波调制信号驱动分布式反馈激光器 (distributed feedback laser, DFB)^[13], DFB 激光器在温控模块和注入电流的控制下产生中心波长为 2 122 nm($4\ 712.905\text{ cm}^{-1}$)的近红外光, 通过预安装在 Ø12 mm 可调准直管内的非球面透镜准直成平行光束, 其中非球面透镜被涂有抗反射涂层以抑制标准子。最终, 含有氢气浓度信息的弱光被汇聚到光电二极管中, 并转化为原始电信号, 供后续电路处理系统使用。光学接收系统核心元件为菲涅尔透镜。光纤准直器作为氢气遥测系统光源部分的重要组成元件, 其作用将发散角较大的光束转换为发散角较小的近似平行光束, 以保障氢气泄漏激光检测系统准确监测到回波信号。回波信号经过前置放大器放大后再通过锁相放大器提

取出带有气体浓度信息的二次谐波信号^[14-15]。本系统由激光器和光电探测器组成的收发系统在同一侧, 可以在一侧正常使用整套设备, 具有轻便、体积小、易操作的优点。

光源模块利用一个高频的正弦信号和一个低频扫描信号作为驱动电路, 低频扫描信号选用锯齿波信号, 控制激光器的波长扫描 2 122 nm ($4\ 712.905\text{ cm}^{-1}$)附近的气体吸收曲线。为了使含有浓度信息的信号噪声更低, 采用高频调制信号对激光输出频率进行建模, 其信号表达式为

$$I(t) = I_0(1 + k_t \cdot \text{trian}(t) + i \cos(\omega_m t)) \quad (1)$$

式中: I_0 为入射光强; $\text{trian}(t)$ 是三角波; i 为高频调制信号引起的幅度调制系数, 取值为 0.22; k_t 为三角波引起的幅度调制系数, 取值为 0.39; ω_m 为电流调制频率。根据式(1)搭建的模型如图 2 所示。光源模块输入参数为: 中心频率 $4\ 712.905\text{ cm}^{-1}$; 入射光强 10 mV; 正弦波信号频率 10 kHz, 幅度 0.1 V。

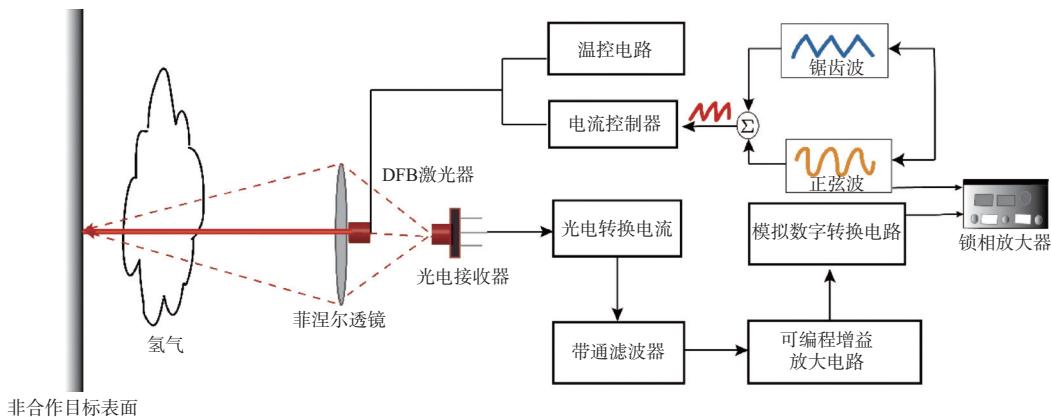


图 1 氢气遥测 TDLAS 系统

Fig. 1 Hydrogen telemetry TDLAS system

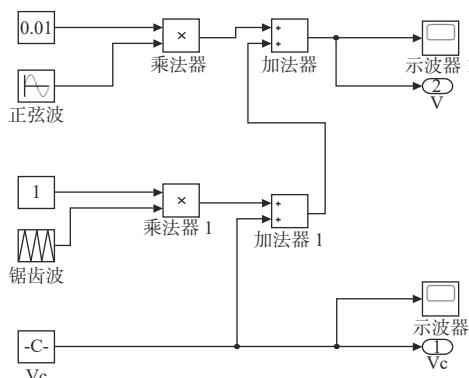


图 2 光源模块

Fig. 2 Light source module

经光源模块调制输出的激光穿过开放性环境后, 被泄漏的氢气吸收, 经过吸收后的激光束投射

到具有后向反射性的目标表面上, 经过镜反射和漫反射叠加, 最终被光电探测器接收。激光辐射传输模型如图 3 所示。

激光回波信号的入射光强为

$$I_0' = \phi L \Omega e^{-\sigma(\lambda)D_r} \cos\theta_r \quad (2)$$

式中: ϕ 为入射激光光斑面积; Ω 为入瞳立体角; $\sigma(\lambda)$ 为激光大气传输消光系数; D_r 为传输距离; θ_r 为光电探测器和目标表面夹角。

非合作目标表面反射入射光的辐亮度为

$$L = \frac{4I_0 T_e R e^{-\sigma(\lambda)D_e} \cos\theta_e}{\pi^2 \omega^2 D_e^2} \quad (3)$$

式中: I_0 为入射光强; T_e 为发射光学系统透过率; R 为表面反射率; D_e 为激光发射系统与非合作目

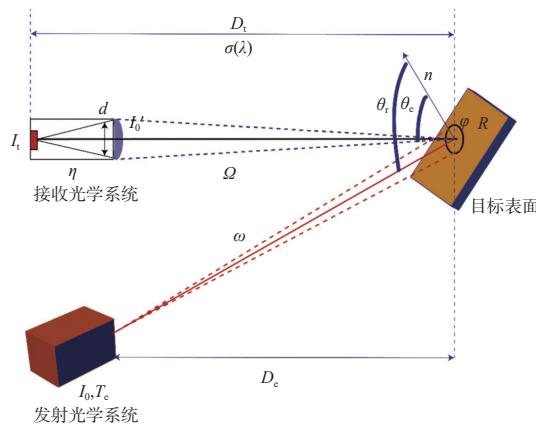


图 3 非合作目标表面激光辐射传输模型

Fig. 3 Diagram of laser radiation transmission model of non-cooperative target surface

标间距, θ_e 为激光束与非合作目标表面夹角; ω 为激光光束发散角。入射激光光斑面积的表达式为

$$\phi = \frac{\pi D_e^2 \omega^2}{4 \cos \theta_e} \quad (4)$$

入瞳立体角为

$$\Omega = \frac{\pi d^2}{4 D_r^2} \quad (5)$$

式中 d 为入瞳口径, 可进一步表示为

$$d = \frac{f}{F} \quad (6)$$

式中: f 为焦距; F 为菲涅尔透镜 F 数。联立式(2)~式(6), 得到光接收机激光回波入射光强为

$$I'_t = I_0 T_e R \frac{d^2}{4 D^2} e^{-2\sigma(\lambda)D} \quad (7)$$

式中大气透过率 $e^{-2\sigma(\lambda)D}=99\%$ (本系统工作环境处于厂房或厂区)。根据式(7)搭建开放光路气体吸收模块如图 4 所示。

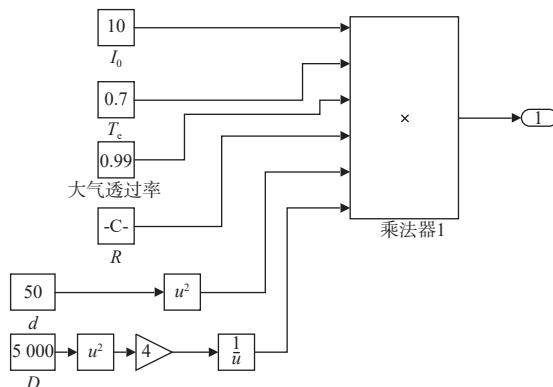


图 4 开放光路模块设计

Fig. 4 Module design of open optical path

式(8)为气体被吸收后的光强。透射光强的二次谐波系数如式(8)所示:

$$I_t = I'_t (1 + \delta I \cos \omega_a t) \exp(-S(T)g(V_a \cos \omega_a)P_{abs}ND) \quad (8)$$

式中: I_0 为入射光强; δI 为光强调制系数; ω_a 为电流调制频率; N 为气体分子数密度; 大气压强 $P=1 \text{ atm}$, 则透射光强的二次谐波系数表示为

$$I_{2f} = I_0' H_2(x, m) \quad (9)$$

$$H_2(x, m) = \frac{2NLP_{abs}S(T)}{\pi \Delta v_c} \times \left[\frac{\sqrt{2}}{m^2} \times \frac{M+1-x^2 \sqrt{\sqrt{M^2+4x^2}+M}+4x \sqrt{\sqrt{M^2+4x^2}-M}}{\sqrt{M^2+4x^2}} - \frac{4}{m^2} \right] \quad (10)$$

式中 m 为调制深度, 可进一步表示为

$$m = \frac{v_a}{\Delta v_c / 2} \quad (11)$$

$$x = \frac{v - v_c}{\Delta v_c / 2} \quad (12)$$

$$M = 1 + m^2 - x^2 \quad (13)$$

吸光度为

$$\ln(I'_t/I_t) = S(T)g(v_c + v_a \cos \omega_a)P_{abs}ND \quad (14)$$

式中: I_t 为探测器接收光强; 气体吸收线强 $S(T)=0.000\,029 \text{ atm}$, 其模型如图 5 所示。

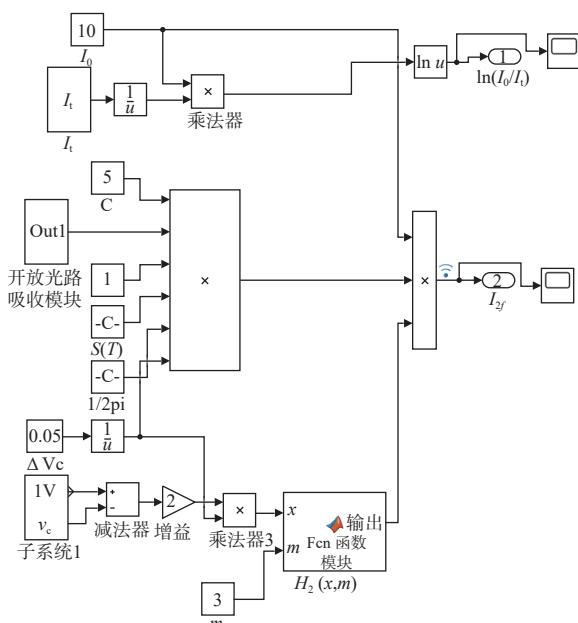


图 5 数据检测模块

Fig. 5 Data detection module

2 结果讨论与分析

2.1 各模块输出仿真结果

经调制后的激光器输出频率 v 和中心频率 v_c 如图 6 和图 7 所示。 v_c 的值为 $4\,712.905 \text{ cm}^{-1}$ 。

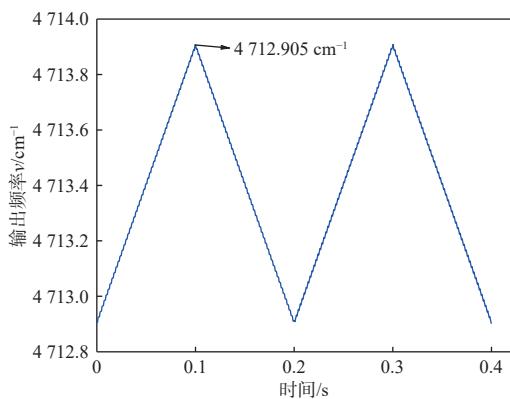


图 6 输出频率

Fig. 6 Output frequency

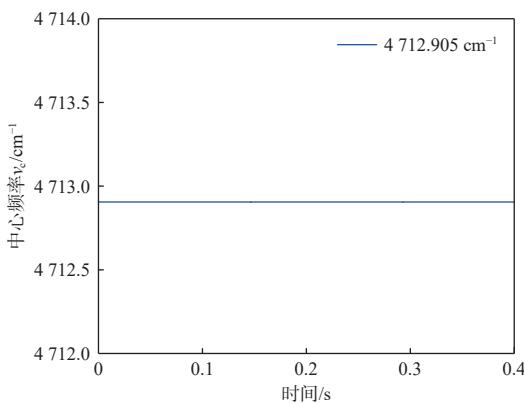
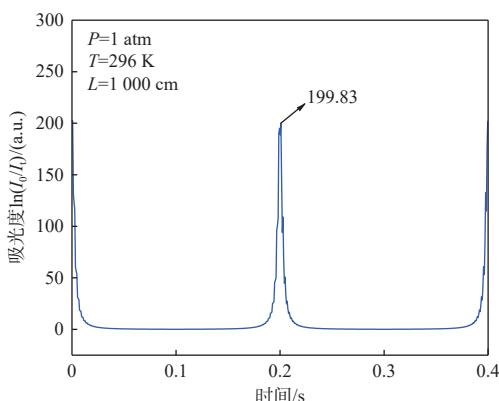


图 7 中心频率

Fig. 7 Centre frequency

经开放光路吸收后的氢气吸收曲线如图 8 所示, 探测器接收光强波形如图 9 所示。

图 8 吸光度 $\ln(I_0/I_r)$ Fig. 8 Absorbance $\ln(I_0/I_r)$

如图 10 所示, P_{\max} 为二次谐波信号的峰值, 用其衡量信号整体的幅值水平, 利用峰值及峰值处所对应的各采样周期的标准差计算得到信噪比; 峰高为峰值与谷值的差, h_a 和 h_b 为信号左右两侧峰高, 用其比值衡量信号的对称性, 比值越小, 信号对称性

越好; 两个峰谷的间距为峰宽。将上述评估指标作为依据调试二次波形, 从而提升系统的检测精度。

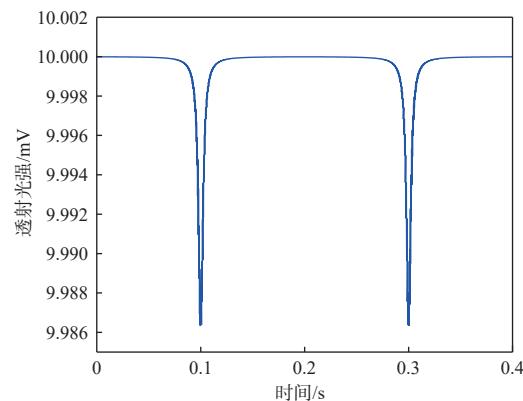
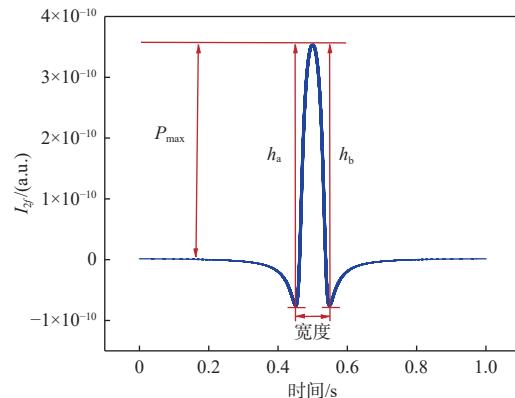
图 9 探测器接收光强 I_t Fig. 9 Detector received light intensity I_t 

图 10 二次谐波信号

Fig. 10 Second harmonic signal

2.2 菲涅尔透镜基本参数对二次谐波的影响分析

当激光入射到非合作目标表面时, 不同的材料反射率不同, 会导致光电探测器接收到的光强不同。为了分析不同材料对激光回波功率的影响, 利用 TracePro 对常见的目标表面材料后向反射功率与检测距离之间的关系建模仿真, 利用双向表面散射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 的 ABg 模型表征光学元件的表面散射特性。本文分别选用木板、塑料、铝板及石灰作为目标表面, 其表面特性参数如表 1 所示。

表 1 材料表面特性参数

Table 1 Parameters of material surface properties

表面材料	吸收率	反射率	BRDF
木板	0.06	0	$0.94 (A=0.5386, B=0.8, g=0)$
塑料	0.23	0	$0.77 (A=0.125, B=0.0035, g=1)$
铝板	0.05	0.9487	$0.0013 (A=0.0001, B=0.015, g=2)$
石灰	0.10	0	$0.90 (A=0.3151, B=0.1, g=0)$

激光初始光强为 10 mW, 不同检测距离下常见非合作目标表面后向反射激光功率如图 11 所示, 目标表面材料的粗糙程度对激光回波功率有较大影响, 且检测距离越大, 差异越明显, 各材料表面反射的激光回波功率越低^[16]。当检测距离大于 1 m 时, 激光回波功率低于 10^{-4} mW。根据文献 [17] 中“采集到的电信号基础噪声为 1.5 mV, 假设信噪比 $R_{SN} \geq 3$ 时能实现有效测量, 则探测器响应回波光信号的输出电压至少为 4.5 mV, 因此回波光功率至少为 0.35 μW。”所以当回波功率为 0.35 μW 时, 可知不同材料下接收表面的最大距离如图 11 所示。当非合作目标为木板、石灰、塑料、铝板时, 最远探测单程距离分别为 1.8 m、2.4 m、4 m 和 6 m。通过优化菲涅尔透镜的基本参数 F 数、激光调制参数来提高粗糙非合作目标表面下的激光回波功率, 从而提高系统的信噪比和检测精度。

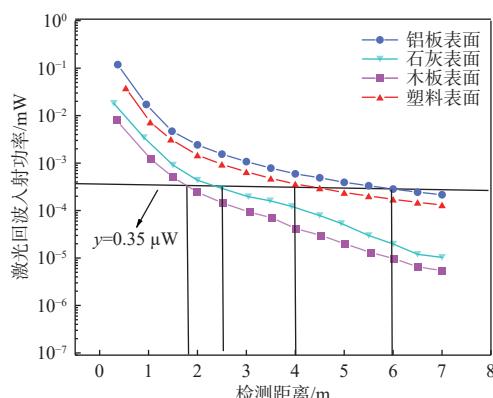


图 11 不同检测距离下常见非合作目标表面后向反射激光功率

Fig. 11 Backward reflected laser power on surface of common non-cooperative targets at different detection distances

从图 3 可知, I_0' 为激光回波入射光强, I_t 为探测器接收光强, η 为接收光学系统的光学效率, 则激光回波入射光强与探测器接收光强之间的关系如式(15)所示:

$$I_t = \eta I_0' \quad (15)$$

光学效率会随 F 数的增加而增加, F 数通常与两种因素相关, 分别是入瞳孔径和焦距。当调整这两个因素以改变 F 数时, 探测器接收光强会发生不同的变化。当 F 数较小时, 部分入射光线在菲涅尔透镜内部会产生不规则散射效应, 使光能量损失导致透镜的光学效率降低。在图 12 中, 保

持焦距为 90 mm, 通过改变入瞳孔径的大小来调整 F 数。进入菲涅尔透镜的光线随着入瞳孔径的增大而增加, 所以激光回波入射光强也会随之增加, 同时入瞳孔径与 F 数呈反比关系。因此, 代入仿真数据所得, 探测器接收光强 I_t 与 F 数的关系如图 13 所示。保持入瞳孔径为 50 mm, 通过改变焦距调整 F 数的大小。在这种情况下, 入瞳孔径大小保持不变, 激光回波入射光强与菲涅尔透镜的焦距无关, 因此 I_0' 保持不变。

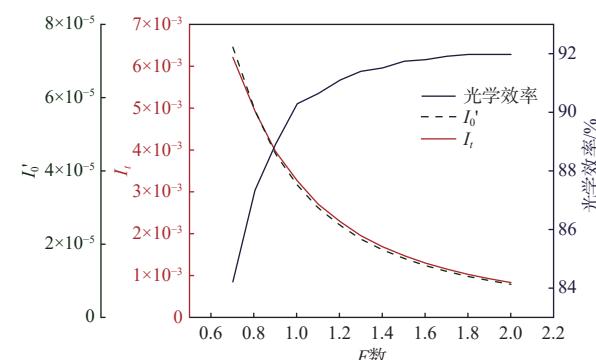


图 12 探测器接收光强与 F 数(改变入瞳孔径)的关系

Fig. 12 Relations of light intensity received by detector and F number (changing diameters of pupil)

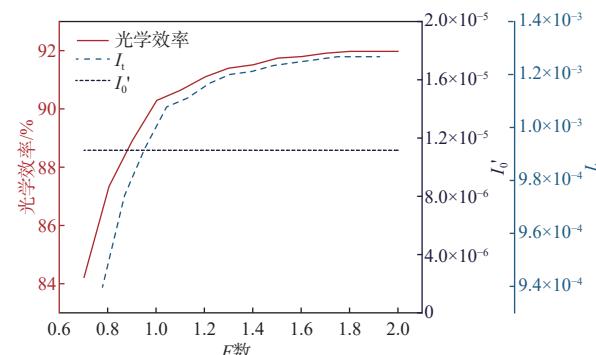


图 13 探测器接收光强与 F 数(改变焦距)的关系

Fig. 13 Relations of light intensity received by detector and F number (changing focal length)

2.3 扫描幅度和扫描频率对二次谐波信号的影响分析

如图 14 为不同扫描幅度幅值下的二次谐波波形变化情况, 若扫描幅度过小, 便无法显示出完整的二次谐波线形, 所以扫描幅度幅值在 0.5 V~5 V 之间选取。观测在不同扫描幅度幅值下的二次谐波的波形变化, 幅值越大, 峰宽越大, 但随之噪声也越大, 考虑到二次谐波的噪声要尽量小的需求和线形完整情况, 最终选取扫描幅度为 1 V。

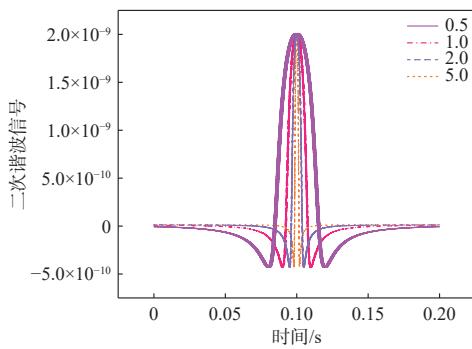
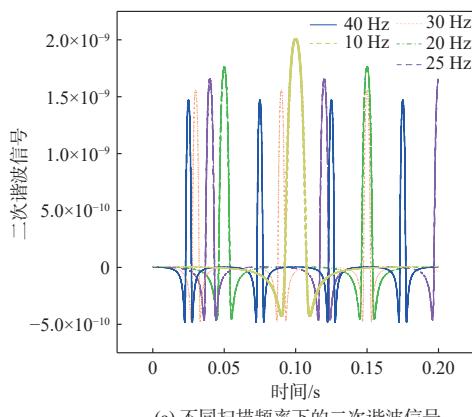


图 14 不同扫描幅度下的二次谐波信号

Fig. 14 Second harmonic signals at different scanning amplitudes

如图 15 为不同扫描频率下的二次谐波信号, 波形的频率随着扫描频率的变化而变化, 保持其他参量不变, 扫描频率越小, 检测速度越快, 在相同时时间内波形的周期越小。保持采样率不变, 若扫描频率增加, 单周期内采样点数随之降低, 精度也随之降低, 所以在选择扫描频率时, 要考虑到具体检测环境对精度的需求度。



(a) 不同扫描频率下的二次谐波信号

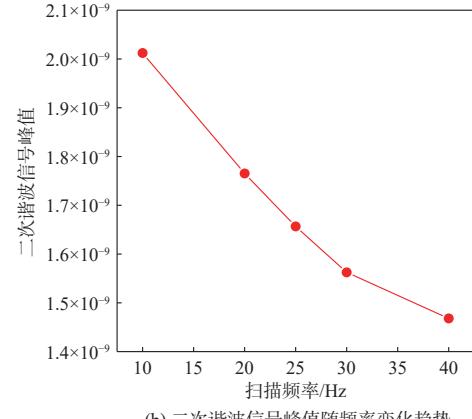


图 15 不同扫描频率下的二次谐波信号

Fig. 15 Second harmonic signals at different scanning frequencies

因本系统是氢气气体检测系统, 对检测精度的

要求较高, 所以在选择扫描频率时应尽量小, 以提高测量精度。扫描频率取值范围确定在 10 Hz~40 Hz 之间, 由图 15(a)可见, 扫描频率在 10 Hz 时二次谐波的波形最佳; 由图 15(b)可见, 二次谐波的峰值随着扫描幅度值的降低而降低。

结合以上优化原则, 当扫描频率为 10 Hz、扫描幅度为 1 V 时, 信号的峰值较高且稳定性更好, 整体系统性能最优。

2.4 调制参数前后系统性能对比分析

将上述分析中得到的最优参数代入重新调整模型, 图 16 为优化系统后各材料在不同检测距离下的激光回波入射功率。当回波功率为 $0.35 \mu\text{W}$ 时, 木板、石灰、塑料、铝板为非合作目标可实现的最远探测单程距离分别为 2 m、2.8 m、5.1 m 和 10 m。

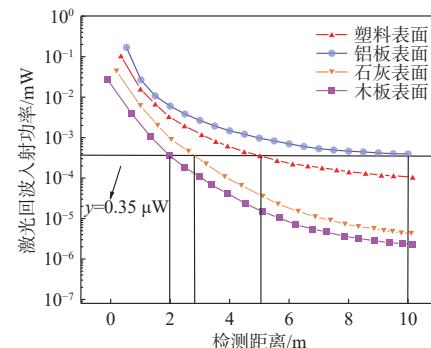


图 16 优化后不同材料在不同检测距离下的激光回波入射功率

Fig. 16 Optimized laser-echo incident power for different materials at different detection distances

根据上述分析结果对系统光电参数进行优化调整后, 使用该系统对不同浓度的氢气泄漏气体进行检测, 如图 17 所示为不同浓度下($0.01 \sim 0.05$) 的二次谐波信号。得到的二次谐波波形左右两侧峰高比值接近 1, 信号对称性较好且信号精度和信号的峰值较高, 进一步验证了该系统检测氢气浓度的可行性。

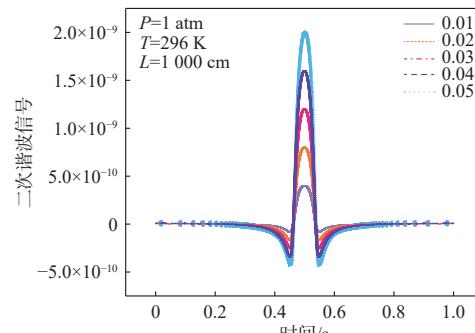


图 17 不同浓度下的二次谐波信号

Fig. 17 Second harmonic signals at different concentrations

3 结论

本文研发了一套基于 TDLAS-WMS 技术开放光路下的氢气泄漏遥测系统, 对检测环境的包容性高, 且可以避免检测人员与待测气体直接接触。选取 2 122 nm($4\ 712.905\ \text{cm}^{-1}$)处的氢气光谱吸收峰进行检测, 模拟了波长调制吸收信号及二次谐波信号的提取过程, 以二次谐波的信噪比、峰值、峰宽作为评估参量, 对二次谐波波形进行优化以提高系统监测精度。经过测试, 扫描幅度为 1 V, 扫描频率为 10 Hz 时二次谐波信号波形的效果最佳, 且木板、石灰、塑料、铝板为非合作目标可实现的最远探测单程距离分别从 1.8 m、2.4 m、4 m 和 6 m 提升至 2 m、2.8 m、5.1 m 和 10 m。优化后测量系统激光入射回波功率有显著提高, 整个测量系统达到了最优的水平。

在测量过程中, 若遇到天气极端变化情况, 如因下雨导致激光器发射光束被遮挡, 一方面激光光束在穿过气体时会受到影响, 另一方面温湿度也会影响到遥测的精度, 后续将围绕以上不足对系统进行优化。

参考文献:

- [1] KOO W T, CHO H J, KIM D H, et al. Chemiresistive hydrogen sensors: fundamentals, recent advances, and challenges[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11): 14284-14322.
- [2] ABDIN Z, ZAFARANLOO A, RAFIEE A, et al. Hydrogen as an energy vector[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120: 109620.
- [3] CHEN Z, HU K, YANG P, et al. Hydrogen sensors based on Pt-decorated SnO₂ nanorods with fast and sensitive room-temperature sensing performance[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 811: 152086.
- [4] 刘志刚. 有害气体检测的电化学技术研究[J]. 轻工科技, 2019, 35(4): 29-30.
LIU Zhigang. Research on electrochemical technologies for harmful gas detection[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2019, 35(4): 29-30.
- [5] IVANOV I I, BARANOV A M, TALIPOV V A, et al. Investigation of catalytic hydrogen sensors with platinum group catalysts[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 346: 130515.
- [6] 郑为建, 余春超, 杨智雄, 等. 宽谱段环境污染气体红外遥测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 108-115.
ZHENG Weijian, YU Chuncho, YANG Zhixiong, et al. Research on infrared telemetry technology of environmental pollution gases in broad spectral band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 108-115.
- [7] 梁晓峰, 杨泽后, 王顺艳, 等. 基于差分吸收激光雷达有毒有害气体遥测进展[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 53-60.
LIANG Xiaofeng, YANG Zehou, WANG Shunyan, et al. Progress of toxic and hazardous gas telemetry based on differential absorption lidar[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(1): 53-60.
- [8] DENG B, SIMA C, AO Y, et al. Modified laser scanning technique in wavelength modulation spectroscopy for advanced TDLAS gas sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106906.
- [9] 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): 306-314.
ZHOU Yanwen, MIAO Shuzhuo, YAO Dan, et al. A laser methane telemetry system based on wavelength-modulated spectroscopy and wavelet denoising[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 306-314.
- [10] 徐俊, 李云飞, 程跃, 等. 基于 TDLAS-WMS 的甲烷泄漏遥测系统研制[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 376-384.
XU Jun, LI Yunfei, CHENG Yue, et al. Development of methane leakage telemetry system based on TDLAS-WMS[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 376-384.
- [11] 周振, 程跃, 殷松峰, 等. 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[J]. 光电子·激光, 2023, 34(8): 861-871.
ZHOU Zhen, CHENG Yue, YIN Songfeng, et al. Simulation analysis and experimental study of high-precision laser methane telemetry parameters for non-cooperative targets[J]. *Optoelectronics-Laser*, 2023, 34(8): 861-871.
- [12] 刘东, 程跃, 周振, 等. 基于 Simulink 手持式激光甲烷遥测仪标定方法仿真分析与试验研究[J]. 应用激光, 2022, 42(12): 106-118.
LIU Dong, CHENG Yue, ZHOU Zhen, et al. Simulation analysis and experimental research on calibration method of handheld laser methane telemetry instrument based on Simulink[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(12): 106-118.
- [13] FENG Y, CHANG J, CHEN X, et al. Application of TDM and FDM methods in TDLAS based multi-gas detection[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53: 1-11.

- [14] LU H, ZHENG C, ZHANG L, et al. A remote sensor system based on TDLAS technique for ammonia leakage monitoring[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2448.
- [15] 贾军伟, 李伟, 柴昊, 等. 基于 TDLAS 的气体检测技术算法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 202-208.
JIA Junwei, LI Wei, CHAI Hao, et al. Gas detection technology algorithm based on TDLAS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 202-208.
- [16] GENG D, WANG D, LI Y, et al. Detection stability improvement of near-infrared laser telemetry for methane emission from oil/gas station using a catadioptric optical receiver[J]. *Energies*, 2023, 16(9): 3854.
- [17] 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 Jinyi, FAN Hongqing, YU Ziwei, et al. Non-cooperative target TDLAS indoor CO₂ telemetry[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 41(10): 229-236.