

基于激光遥感的甲烷泄漏源搜索系统

贾彦杰¹, 杨旻¹, 彭睿¹, 王川¹, 孙冬远², 于立成², 田亚莉³, 邱选兵³

(1. 国家管网集团西南管道有限责任公司, 成都 610041; 2. 海隆石油集团(上海)信息技术有限公司, 上海 200949;
3. 太原科技大学 应用科学学院; 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心, 太原 030024)

摘要: 为了弥补传统人工在天然气生产、运输和存储过程甲烷泄漏巡检中存在的劳动强度大、容易漏检、耗时耗力等不足, 提出了一种基于激光遥感吸收光谱技术的甲烷泄漏搜索系统。选用近红外 1 653.7 nm 的 TO 封装 DFB 激光器作为光源, 以收发一体的卡塞格林光学结构进行发射激光和接收来自反射回来的微弱光信号, 采用嵌入式单片机实现光信号的调制与解调。以开源 ArduPilot AMP2.8 作为无人机的飞控, 采用 433 MHz 无线模块进行甲烷泄漏数据实时传送, 计算机接收端以 LabView 虚拟仪器开发了接收应用程序进行数据的接收、显示和存储。以体积分数为 10^{-3} 的甲烷气袋为搜索目标, 采用 Z 字形搜索算法模拟了现场甲烷泄漏搜索实验。实验结果表明, 该算法具有较高的检测精度和定位准确性, 能够准确地检测到甲烷泄漏源位置。这为天然气泄漏源的快速检测和定位提供了有效的技术支持。

关键词: 天然气泄漏; 激光遥感; 无人机; Z 字形搜索

中图分类号: O433.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2024)04-0057-06

随着全球能源需求的不断增长, 天然气作为一种清洁、高效的能源, 越来越受到政府和企业的的高度重视。然而, 天然气的开采、运输和存储过程中, 其泄漏事故频发, 不仅造成环境污染, 还可能引发火灾、爆炸等严重安全事故。因此, 对天然气生产、运输和存储过程中甲烷泄漏的巡检和监测显得尤为重要。

天然气的主要成分是甲烷, 其占比超过 85%。传统的天然气泄漏巡检主要依赖人工巡检^[1], 该方法劳动强度大、耗时耗力、无法快速准确判断泄漏点位置信息。部分采用固定式检测设备^[2-3], 这些方法存在一定的局限性, 如系统复杂、检测范围有限、不能实时监测、时空分辨率低等。近年来, 随着可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)的快速发展, 人们开始将其广泛应用于痕量甲烷气体传感领域^[4-5]。它是一种非侵入式、灵敏、快速的检测手段^[6-7], 可实现微泄漏遥感检测。将便携轻质的甲烷遥测仪搭载到小型无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)上, 可以对天然气开采、运输和存储过程中散逸性、间歇性排放的甲烷实现快速、实时、高精度、大范围的探测和预警。OBERLE 等^[8]在旋翼无人机上安装了一个甲烷传感器(质量为 (0.6 ± 0.06) kg), 绘制了北极永久冻土上甲烷的空间分布图, 经过校准后甲烷体积分数的不确定性为 $\pm 40\%$ 。NATHAN 等^[9]使用遥控飞机搭载 3.1 kg 的甲烷传感器, 量化天然气压缩站甲烷泄漏情况, 体积分数探测精度可达 10^{-7} 。2018 年, 连接到固定翼无人机的 TDLAS 分析仪成功检测到天然气泄漏, 飞行时间为 90 min^[10], 检漏率仅为 20%^[11]。综上所述, 基于激光遥感的较大区域内甲烷泄漏巡检的效率和准确性还有待进一步提高。

因此, 本文借助无人机和数传模块, 提出了一种基于激光遥感的大范围内甲烷泄漏源搜索系统。利用四旋

收稿日期: 2023-09-24; 修回日期: 2023-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金(52076145; 12304403).

作者简介: 贾彦杰(1983-), 男, 河北鹿泉人, 国家管网集团西南管道有限责任公司高级工程师, 博士, 研究方向为长输管道功能安全分析与设备可靠性提升, E-mail: jiayj01@pipechina.com.cn.

通信作者: 邱选兵, E-mail: qiuxb@tyust.edu.cn.

引用本文: 贾彦杰, 杨旻, 彭睿, 等. 基于激光遥感的甲烷泄漏源搜索系统[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 57-62. (Jia Yanjie, Yang Yang, Peng Rui, et al. A methane leak source detection system based on laser remote sensing[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2024, 52(4): 57-62. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.09.24.0002.)

翼无人机搭载激光甲烷遥测仪,对甲烷体积分数、无人机飞行高度等各项参数进行实时采集和无线传输,通过 LabView 虚拟仪器面板实现对泄漏源的检测与定位,并及时发出泄漏警报信号。

1 泄漏搜索算法

1.1 搜索算法

利用 TDLAS 对甲烷泄漏进行遥测,以 Z 字形模式进行搜索,其获取的甲烷体积分数数据是二维离散的.为了更好地监测和分析甲烷泄漏情况,将这个二维体积分数数据表示为矩阵 $C_{m \times n}$,每个矩阵元代表一次遥测的体积分数,矩阵中第 m 行和 n 列的矩阵元右下角标数值表示搜索扫描空间的 X 轴和 Y 轴的坐标.通过二维体积分数矩阵,可以将甲烷泄漏的定位问题转化为一个具有一定物理意义的数学问题进行研究.为了确定甲烷泄漏是否存在,首先将上述矩阵进行网格划分,通过迭代搜索网格中的极值点,判断该网格内是否存在甲烷泄漏点,如有泄漏,则在该网格附近继续搜索.对各个网格极值点再次组合搜索得出全局极值点,最终得到多个泄漏位置的估计结果.通过这种方法可以确定整体遥测范围内是否有泄漏存在,并对其进行定位。

1.2 路线规划

在基于激光遥感的甲烷泄漏源搜索算法研究中,无人机路线规划是实现快速、准确检测和定位的重要步骤之一.首先,需要选择一个合适的场地模拟天然气生产、运输和加气站等大型场所的甲烷泄漏.考虑到校园内足球场是一个相对开阔的大范围区域($105 \text{ m} \times 70 \text{ m}$),没有障碍物阻挡激光遥感信号的传播,确保激光遥感设备能够准确地获取到甲烷泄漏源的位置和强度信息.其次,足球场的边界清晰可见,方便进行边界定义和目标识别.如图 1 所示,论文采用 Z 字形路径规划来确定无人机的具体飞行轨迹,进而高效地覆盖目标区域.利用激光遥感技术获取足球场上不同区域的甲烷体积分数分布情况,通过对这些数据进行分析 and 处理,从而实现对甲烷泄漏源的检测和定位工作。



图1 无人机路线规划

Fig.1 UAV route planning

2 遥测泄漏搜索系统

遥测泄漏搜索系统主要包括激光甲烷遥测仪、无人机、数传模块与数据监控 3 部分.其中,激光甲烷遥测仪用于检测甲烷气体的体积分数,并将检测数据通过数传模块传输至计算机端;无人机则搭载激光甲烷遥测仪进行空中飞行,通过遥控或自主导航方式实现对目标区域的巡检,完成甲烷泄漏点的定位。

2.1 激光甲烷遥测仪

激光甲烷遥测仪是整个系统的核心部分,该遥测仪基于 TDLAS 技术^[4-7],通过甲烷气体对特定波长激光的吸收,可以定量测量目标区域内的甲烷气体体积分数.本文使用的自制遥测仪(图 2)具有高灵敏度、高分辨率和快速响应的特点.TDLAS 的原理如图 3 所示,选用近红外 $1\ 653.7 \text{ nm}$ 的 TO 封装 DFB 激光器作为光源,以收发一体的卡塞格林光学结构进行发射激光和接收来自反射回来的微弱光信号,采用嵌入式单片机实现光信号的调制与解调^[12].其中,卡塞格林光学望远镜如图 3 虚线框所示,由两块反射镜组成的一种反射式望远镜,反射镜中大的称为主镜,小的称为次镜.主镜为中心开有通孔且反射面为抛物面的凹面镜,次镜是反

射面为双曲面的凹面镜.根据几何原理,使主镜抛物面的焦点和次镜双曲面的虚焦点重合,并成像于双曲面的实焦点处.光线从右侧射入,入射光线照射在主镜反射面上,经主镜反射到达次镜,再经次镜二次反射光束聚焦,并从主镜中心通孔处穿过,成像于主镜背面的焦点处.该光学系统结构紧凑,小巧便携,易于集成,具有大视场和高分辨率,非常适合作为一体化发射接收装置.

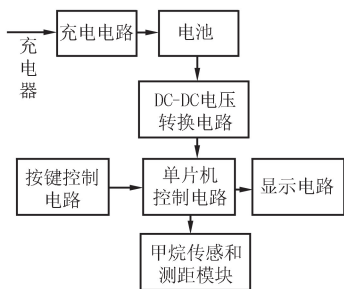


图2 激光甲烷遥测仪原理图

Fig.2 Laser methane remote sensing detector schematic

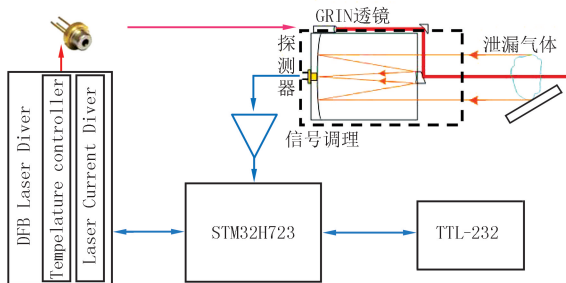


图3 TDLAS原理图

Fig.3 TDLAS schematic

与传统的甲烷气体检测方法相比,激光甲烷遥测仪具有明显的优势:1)探测距离最远 50 m,灵敏度为 10^{-5} m,响应时间为 0.1 s,可以实现对巡检区域内的甲烷体积分数进行灵活动态的检测;2)遥测仪几何尺寸为 115 mm×52 mm×33 mm,质量轻,约为 160 g,提高了无人机飞行时间和速度的限制;3)调制与解调算法可以提高探测的稳定性和可靠性,免受无人机的振动干扰.

2.2 无人机

无人机是整个泄漏搜索系统的执行机构,它搭载遥测仪并配备相应的传感器和控制系统.在巡检过程中,无人机会采集大量的数据,包括地形信息及遥测仪返回的甲烷气体体积分数等.这些数据通过 433 MHz 数传模块传输回地面控制中心进行实时监控和分析.为了确保无人机能够在复杂环境中稳定飞行,论文所组装的无人机如图 4 所示,由四个对称臂的多旋翼框架构成,每个臂都带有一个无刷电机,通过改变四个旋翼的转速来控制保持期望的高度和姿态,并实现轻松导航和轨迹跟踪,同时能够执行垂直起飞和着陆程序,为野外工作提供了实用优势.无人机采用开源的 ArduPilot AMP2.8 作为飞控,以大疆 2312(960 kV)作为电机,以格氏 2 200 mA 容量的电池作为动力源,从而支持携带高达 1 kg 有效载荷进行长达 30 min 的飞行任务.

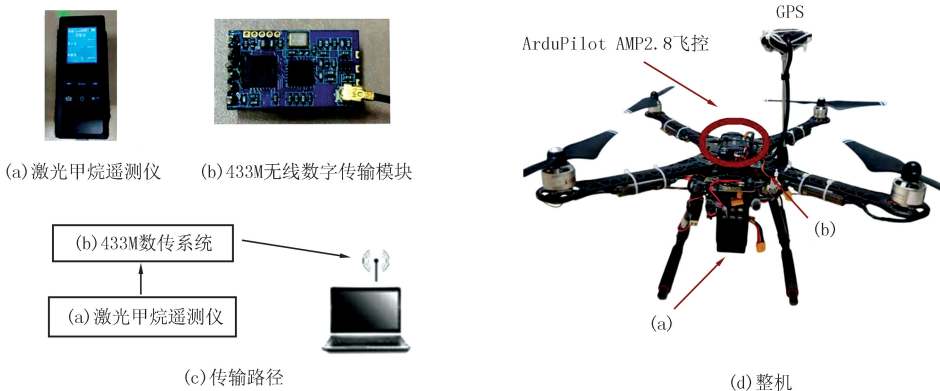


图4 无人机

Fig.4 Unmanned aerial vehicle

2.3 数传模块与数据监控

数传模块和数据监控的结合使得遥测搜索系统能够高效地进行数据传输和数据处理,实现对甲烷泄漏源的快速、准确检测和定位.通过实时监控和分析遥测数据,使无人机飞行路径与甲烷体积分数测量同步,以

便及时发现甲烷泄漏源的存在,并确定其位置和泄漏程度,为后续的应急响应提供科学依据。

数传模块将无人机搭载的激光甲烷遥测仪和 GPS 位置传感器采集到的数据传输回地面控制中心的过程。GPS 位置传感器采集的数据,使用 oculusync 技术传输到远程计算机进行进一步分析。甲烷遥测仪测量到的数据采用 433 MHz 无线通信模块(GC433-TC016)传输到地面接收站。该模块基于 LLCC68 收发芯片与高性能 32 位 M0 单片机开发,穿透性强,传输距离远,支持 41 个信道,提供了更大的灵活性和选择性。

数据监控是指对地面接收站接收到的遥测数据进行实时监测和分析的过程,在计算机端使用 LabView 虚拟仪器对数据进行采集、处理以及显示。图 5 为 LabView 程序控制面板,它提供了方便的数据采集和处理界面。通过 LabView 程序,可以对遥测数据进行实时监测、分析和可视化展示,实现泄漏源定位。

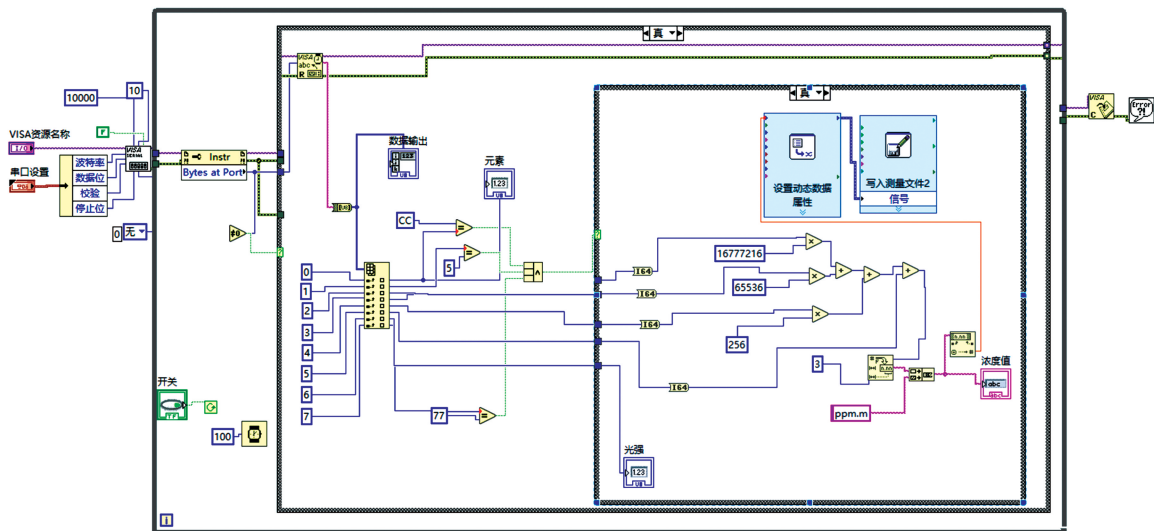


图5 数据监控控制面板

Fig.5 Data monitoring control panel

3 甲烷泄漏搜索实验

甲烷遥测外场应用前,采用体积分数为 10^{-2} 、 3×10^{-2} 的甲烷标气进行校准。这些标气的气体吸收路径约为 70 mm。在距离测量点 10 m 和 25 m 位置上连续测量 300 s 的结果如图 6 所示。甲烷体积分分数测量的波动范围在 3%~10%之间,不同距离下的测量相对误差小于 3.7%。因此该系统能够在不同距离下较为准确地进行甲烷泄漏检测。

在外场模拟实验中,将体积分数为 10^{-2} 的甲烷气袋放置在足球场场地内的任意位置,以便模拟实际环境中可能存在的不同甲烷泄漏源情况。无人机在空速为 3.5 m/s(这个速度既可以保证无人机的飞行安全,又可以满足对大面积区域进行快速扫描的需求。此外,这个速度还可以减小风对无人机的影响,提高飞行的稳定性。),飞行高度为 25~30 m(这个高度既可以保证激光传感器的有效检测范围,又可以避免无人机受到地面障碍物的影响。此外,这个高度还可以减小地面温度对甲烷体积分分数测量的影响,提高测量的准确性。)的情况下,按照预设的 Z 字形路径进行巡检实验。数据采集包含甲烷体积分分数信息和位置信息两部分。甲

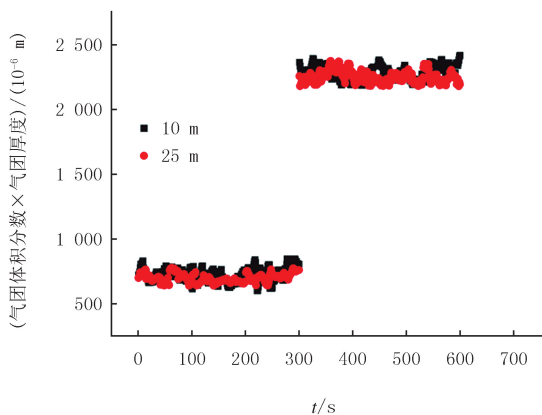


图6 不同距离下甲烷体积分分数校准

Fig.6 Calibration of methane volume fractions at different distances

烷体积分数信息以 10 Hz 的频率进行测量,并以 0.5 s 的时间间隔对其进行平均,通过数传模块传输回地面,如图 7 所示,在远离泄漏点位置,体积分数为 0,随着无人机接近泄漏点,体积分数逐渐变大,在泄漏点达到最大值。

对测量到的不同泄漏值快速组合筛选并进行颜色编码,利用时间戳与采集到的经纬度位置信息进行匹配,完成泄漏位置估计,如图 8 所示,红色表示相对较高的甲烷体积分数,中等和低体积分数的用黄色和绿色表示,这与气袋内给定的典型甲烷体积分数基本保持一致,当 LabView 虚拟仪器监测到甲烷泄漏数据时,立即启动报警并反馈泄漏点的位置,经过多次实验验证,检漏率达到 95% 以上,相较于参考文献[11]中 20% 的检漏率,本文系统检漏率得到了大幅度提高,从而验证了该系统对甲烷泄漏源的准确定位和高灵敏检测。

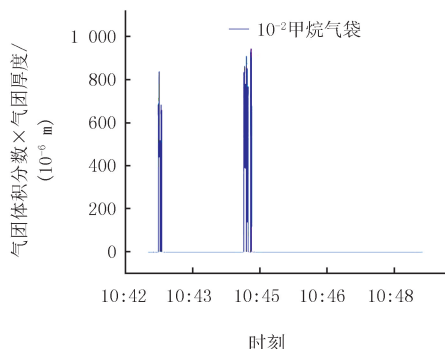


图7 甲烷体积分数测量值

Fig.7 Measurement of methane volume fractions

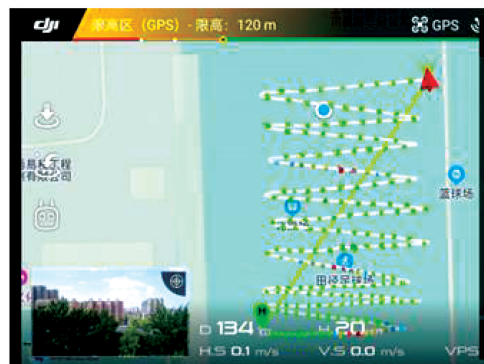


图8 无人机实际飞行检测结果

Fig.8 UAV actual flight testing results

4 结 论

论文通过利用可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)对甲烷泄漏进行准确检测和定位,通过测量大气中甲烷分子对特定波长 1 653.7 nm 光的吸收情况,能够准确地确定甲烷的体积分数分布,同时还利用 GPS 技术获取了实验区域的地理位置信息,将激光遥感测量数据与 GPS 位置信息相结合,通过数据处理算法对甲烷泄漏源进行自动识别和定位,实验结果表明,基于激光遥感的甲烷泄漏源搜索算法具有较高的准确性和可靠性,本方法能够准确地检测和定位甲烷泄漏源,为甲烷泄漏监测和管理提供了一种高效、经济的方法。

参 考 文 献

- [1] ADENUBI S, APPAH D, OKAFOR E, et al. A review of leak detection systems for natural gas pipelines and facilities[J]. Journal of Energy Technologies and Policy, 2023, 13(2): 9-19.
- [2] MINATO A, JOARDER M M A, OZAWA S, et al. Development of a lidar system for measuring methane using a gas correlation method [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1999, 38(10R): 6130.
- [3] 李正友, 袁明君, 徐洋, 等. 基于 TDLAS 技术的甲烷气体泄漏成像检测[J]. 激光杂志, 2024, 45(2): 48-53.
LI Z Y, YUAN M J, XU Y, et al. Imaging detection of methane gas leakage based on TDLAS technology[J]. Laser Journal, 2024, 45(2): 48-53.
- [4] 董磊, 李尚志, 尚智金, 等. 音叉式石英晶振用于声学气体传感的研究进展[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 16-28.
DONG L, LI S Z, SHANG Z J, et al. Advances in quartz tuning fork based photoacoustic gas sensing[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2022, 50(2): 16-28.
- [5] 朱云伟. TDLAS 技术在天然气泄漏检测中的应用研究[J]. 管道技术与设备, 2023(2): 19-22.
ZHU Y W. Application analysis of TDLAS technology in natural gas leakage detection[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2023(2): 19-22.
- [6] 钱济人, 张富诚, 丁艳军, 等. 基于 TDLAS 的天然气泄漏空间动态分布监测技术及应用研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(3): 360-367.
QIAN J R, ZHANG F C, DING Y J, et al. Research on space dynamic distribution monitoring technology and application of natural gas

- leak based on TDLAS[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 360-367.
- [7] FENG S L, QIU X B, GUO G Q, et al. Palm-sized laser spectrometer with high robustness and sensitivity for trace gas detection using a novel double-layer toroidal cell[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(10): 4552-4558.
- [8] OBERLE F K J, GIBBS A E, RICHMOND B M, et al. Towards determining spatial methane distribution on Arctic permafrost bluffs with an unmanned aerial system[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(3): 236.
- [9] NATHAN B J, GOLSTON L M, O'BRIEN A S, et al. Near-field characterization of methane emission variability from a compressor station using a model aircraft[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(13): 7896-7903.
- [10] BARCHYN T, HUGENHOLTZ C H, MYSHAK S, et al. A UAV-based system for detecting natural gas leaks[J]. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2018, 6(1): 18-30.
- [11] BARCHYN T E, HUGENHOLTZ C H, FOX T A. Plume detection modeling of a drone-based natural gas leak detection system[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2019, 7: 41.
- [12] 魏永卜, 邱选兵, 张恩华, 等. 基于数字锁相的激光光谱早期火灾预警系统[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 52-57.
- WEI Y B, QIU X B, ZHANG E H, et al. Early fire warning system based on digital lock-in amplifier using laser spectroscopy technology[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 48(3): 52-57.

A methane leak source detection system based on laser remote sensing

Jia Yanjie¹, Yang Yang¹, Peng Rui¹, Wang Chuan¹, Sun Dongyuan²,
Yu Licheng², Tian Yali³, Qiu Xuanbing³

(1. PipeChina Group Southwest Pipeline Co., Ltd., Chengdu 610041, China; 2. Hilong Group(Shanghai)Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200949, China; 3. School of Applied Science; Shanxi Province Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to address the limitations of traditional manual methane leak inspections in natural gas production, transportation, and storage processes, such as high labor intensity, susceptibility to missed detections, and time-consuming efforts, a methane leak detection system based on laser remote sensing absorption spectroscopy technology is proposed. A TO-packaged laser at 1 653.7 nm in the near-infrared range is chosen as the light source. The system utilizes a Cassegrain optical structure for both laser emission and reception of weak light signals reflected back. Embedded microcontrollers are employed for modulating and demodulating the light signals. The ArduPilot AMP2.8 open-source autopilot is used for unmanned aerial vehicle(UAV)control, with a 433 MHz wireless module for real-time methane leak data transmission. On the computer receiver side, a LabView virtual instrument is developed for data reception, display, and storage. Methane gas bags of different volume fractions are used as search targets, and a Z-shaped search algorithm is employed to simulate on-site methane leak search experiments. Experimental results demonstrate that this algorithm exhibits high detection accuracy and precise localization, accurately pinpointing methane leak source locations, providing effective technical support for the rapid detection and localization of natural gas leak sources.

Keywords: natural gas leaks; laser remote sensing; unmanned aerial vehicle; Z-shaped search

[责任编辑 杨浦 刘洋]