

应用于燃气管道泄漏检测的手持激光甲烷遥测仪的设计

许晶晶 (郑州华润燃气股份有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 基于 TDLAS 技术和激光遥测技术设计了手持激光甲烷遥测仪, 并进行了灵敏度、检测距离及小区内居民楼燃气泄漏的模拟测试。测试表明, 该仪器可探测到 $50\text{ppm} \cdot \text{m}$ 甲烷气体泄漏, 检测距离为 200m, 满足实际应用需要。燃气公司使用表明, 该仪器携带使用方便、遥测距离远、响应快速, 灵敏度高、实用性强, 可进一步推广应用。

关键词: 燃气管道泄漏; 激光遥测; 可调谐半导体激光吸收光谱

0 引言

随着国家新能源、碳中和、碳达峰等战略的实施, 天然气开采、输配、存储等规模不断扩大, 输配管线、场站、存储气站等数量不断增加, 天然气管网建设和运维将面临着新的、更大的挑战。为避免燃气管道泄漏事故的发生, 减少人员伤亡, 及时发现并定位泄漏源, 采取有效防护措施, 对避免环境污染、减少国家经济损失, 保障社会的和谐可持续发展具有重要意义。

但是一般煤矿、天然气管道等容易发生气体泄漏的场所非常危险, 检测人员无法直接靠近, 而传统便携式气体检测仪又必须与泄漏气体近距离接触才能检测, 危险性高且无法快速定位, 无法满足现代燃气的检测需求, 所以开发一种能够远距离、快速检测燃气泄露的产品势在必行。可调谐半导体激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, 简称 TDLAS) 能够快速并准确地分析气体浓度, 具有高选择性、高响应速度、高分辨率、可连续实时测量、环境适应性强等优点, 近年来备受科研人员的青睐, 广泛应用于大气环境检测、工业气体检测等领域。

本文将 TDLAS 技术和激光遥测技术相结合, 设计了手持激光甲烷遥测仪, 如图 1 所示。该仪器灵敏度高、响应速度快、能实时远程遥测甲烷气体泄漏, 适用于城市燃气输配、石油石化等可能存在燃气泄漏的场所。



图 1 手持激光甲烷遥测仪

1 燃气管道泄漏激光遥测仪基本原理

TDLAS 技术基于朗伯比尔定律, 出射光强 I 与入射光强 I_0 、待测气体的浓度满足以下关系^[1-2]:

$$I = I_0 \exp[-\alpha(v)CL] \quad (1)$$

式 (1) 中, $\alpha(v)$ 为待测气体的吸光度; L 为检测光通过待测气体的光程; C 为待测气体的浓度。计算出射光与入射光的光强比, 就可以反演出待测气体的浓度^[3]。

使用 TDLAS 技术检测气体时, 首先需要根据被测气体选择对应的吸收波长, 再根据对应波长挑选合适的半导体激光器。选择气体吸收波长时要遵循两个原则: ①避免其他气体吸收谱线的干扰; ②待测气体在此吸收线处有较强吸收。

可调谐半导体激光器具有两个特性: 窄线宽和输出波长随工作电流和温度改变, TDLAS 技术主要利用这两个特性实现对气体分子一个或者几个相近的吸收线的测量。根据激光驱动波形的不同, TDLAS 技术分为 DAS 直接吸收光谱技术和 WMS 波长调制光谱技术^[4]两种。

DAS 技术通过检测入射光与出射光的强度直接获得光的吸收能量, 并根据光信号的比例推算出待测气体的浓度。可调谐半导体激光器的波长由其驱动电流和温度共同决定。通过改变驱动电流调节激光器的波长响应快、精度高, 因此气体检测一般采用电流扫描的方式, 扫描信号为三角波、锯齿波、梯形波等。半导体激光器在温度控制模块和电流驱动模块控制下输出覆盖待测气体吸收线的扫描光信号, 计算出射光和入射光的光强比, 反演待测气体的浓度数据。

与 DAS 技术不同, WMS 技术的激光器驱动波形为低频扫描信号叠加高频正弦波调制信号。高频调制信号用于提高检测系统抗噪能力, 低频扫描信号用于使激光器输出覆盖待测气体的吸收谱线的波长。调制

后的光信号被待测气体吸收后,由光电探测器将光信号转换成电信号输入锁相放大单元,经解调后,计算二次谐波 $2f$ 与一次谐波 f 的比值,得到待测气体的浓度。WMS 技术利用信号周期性与噪声随机性之间的差异,大大提高了检测系统的抗噪能力,降低了检测下限,非常适用高灵敏度、高分辨率的痕量气体或污染气体的测量。

2 燃气管道泄漏激光遥测仪硬件设计

手持激光甲烷遥测仪系统设计如图 2 所示,MCU 输出激光驱动信号,通过控制 DFB 激光器的电流和温度使检测激光器输出覆盖待测气体吸收峰的调制光信号。DFB 激光器经过光纤分路器,小部分检测光进入密封有标准甲烷气体的参考气室后由参考探测器接收,经过放大滤波处理后输入 MCU,用来对检测激光器进行波长实时校准。大部分检测激光从接收透镜的中心出射,穿过待测气团,经过背景物散射后,散射光经汇聚接收透镜聚焦到主光电探测器上,再经过放大滤波处理输入 MCU,经过分析解调,反演得到待测气体浓度信息。气体浓度信息传输到显示与信号输出单元进行显示,当测量的气体浓度超出报警阈值后,仪器发出声、光、振动报警。

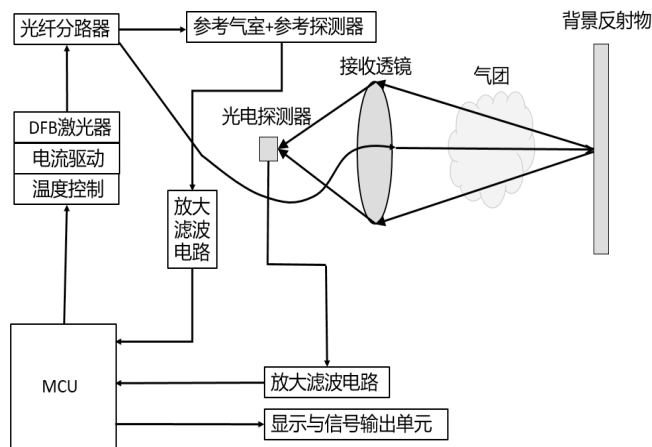


图 2 激光甲烷遥测仪系统设计

2.1 激光驱动电路

激光驱动电路包括 DFB 半导体激光器、电流驱动和温度控制电路。其中 DFB 半导体激光器为日本 NTT Electronics 公司生产的蝶形激光器,选择的甲烷吸收峰为 $1653.7\text{Nm}^{[3]}$ 。

激光器的工作电流和温度共同决定 DFB 半导体激光器的输出波长,本系统采用确定激光器的工作电流,改变激光器的温度来调节激光器的输出波长。首先给

激光器输入一个固定的激光驱动波形后,采集参考探测器的信号,通过调整激光器的温度值,使激光器自动扫描一个温度范围,确定得到参考探测器输出信号的二次谐波信号的峰值为最大时的温度值,并将这个温度值作为激光器原始的温度值,记录在 MCU 中。同时在该温度下对参考探测器进行采样,计算处理后得到参考探测信号的二次谐波信号,根据二次谐波信号峰值的位置和大小计算出最佳吸收峰位置并记录。

进行测量时,系统实时对参考探测器进行采样,得到参考信号的二次谐波,监测参考信号二次谐波波峰的位置和大小,并计算当前位置和设定的最佳吸收峰位置的偏移量;当监测到位置偏移量超过设定的阈值时,微调激光器内置 TEC 的温度,对激光器中心波长进行修正,使二次谐波的波峰保持在最佳吸收峰位置,从而保证手持激光遥测仪的灵敏度和稳定性^[5-6]。

2.2 光电探测单元

光电探测单元由参考光电探测器和主光电探测器组成,均为 InGaAs 光电探测器。其中参考光电探测器前端密封有甲烷标气,用来实时调整激光器的波长,使其稳定在待测气体吸收峰上。探测器的 TIA 放大电路如图 3 所示,该电路用于将 InGaAs 光电探测器接收到的光信号转换为电信号。InGaAs 光电探测器的响应度为 1.1A/W ,响应波长为 $900\text{Nm}\sim 1900\text{Nm}$,温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 。U1 为运算放大器,一般选择低偏置电流的运算放大器,R1 为反馈电阻,C1 为反馈电容,用于防止信号发生振荡^[4]。

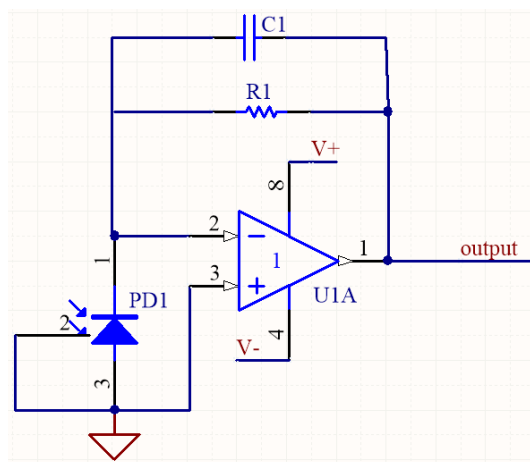


图 3 探测器 TIA 放大电路图

2.3 手机巡检 APP 及远程监控中心

该手持激光甲烷遥测仪包含蓝牙模块,检测数据可通过蓝牙实时传输给手机巡检 APP,APP 可以实时

显示甲烷气体的浓度曲线图,还可将气体浓度信息与遥测仪的巡检轨迹、巡检速度在地图中联合显示。当遥测仪报警时 APP 同时发出报警声音。在巡检过程中,对报警隐患可以进行拍照或者录制视频,获得的照片或小视频可选择上传服务器。巡检结束后,本次巡检轨迹、报警浓度等可以进行回放、查看。数据经过筛选后,检测数据、照片或者小视频可以被上传至远程监控中心^[3]。

远程监控中心具有查看巡检轨迹、隐患点位置、类型、历史数据等功能,还可对巡检轨迹进行回放,查看巡检过程。巡检轨迹与管网 GIS 融合,通过对检测数据的统计、分析和数据挖掘,为巡检人员后期工作提供新的手段和智能化指导,使燃气管理工作从传统化转向科技化,从粗放化转向精细化^[3]。

3 实验结果及分析

为了验证手持激光甲烷遥测仪的性能及实用性,对该遥测仪进行了模拟测试,包括灵敏度测试、检测距离测试,同时对小区内居民楼燃气泄露模拟测试。首先取两个 $40 \times 50\text{cm}$ 的透明气包,分别编号 1#、2# 气包,对应充满 $250\text{ppm} \cdot \text{m}$ 、 $5000\text{ppm} \cdot \text{m}$ 的甲烷标准气体,气包充满后,气包的厚度约 20cm 。经理论计算,1#、2# 气包的积分浓度值分别为: $50\text{ppm} \cdot \text{m}$ 和 $1000\text{ppm} \cdot \text{m}$ 。

3.1 灵敏度测试

取三台手持激光甲烷遥测仪放置于距离 1# 气包 5m 远处,背景反射物为牛皮纸箱,打开仪器后,调整遥测仪照射方向,使检测激光照射到气包,分别记录三台仪器的测试结果,测试三次,数据如表 1 所示。

表 1 5m 灵敏度测试数据表

序号	1# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$	2# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$	3# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$
1	52	49	52
2	51	53	50
3	53	52	53

3.2 检测距离测试

将 2# 气包放置于白板前,取三台手持激光甲烷遥测仪分别距离白板 50m 、 100m 、 150m 和 200m 进行测试,记录测试数据,数据如表 2 所示。

表 2 检测距离测试数据表

距离 m	1# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$	2# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$	3# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$
50	1024	1034	1020
100	1042	997	1015
150	1046	1016	1023
200	1035	1034	1016

3.3 小区内居民楼燃气管道泄露模拟测试

将 2# 气包放置于某小区内居民楼的 5 楼、10 楼、15 楼、20 楼、25 楼和 30 楼处,取三台手持激光甲烷遥测仪在楼下照射气包进行测试,记录测试数据,数据如表 3 所示。

表 3 居民楼燃气管道泄露模拟测试数据表

楼层	1# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$	2# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$	3# 遥测仪 $\text{ppm} \cdot \text{m}$
5	1017	980	1035
10	1013	1023	1025
15	1034	1025	1026
20	1046	1069	1058
25	986	988	1025
30	1036	976	1023

测试结果表明:手持激光甲烷遥测仪 5m 处可检测 $50\text{ppm} \cdot \text{m}$ 的甲烷气体泄漏,检测距离为 200m ,并可检测小区内居民楼 30 层处的甲烷气体泄漏,灵敏度、测量距离及测量误差均满足实际检测需要。同时,该仪器也在燃气公司进行了实际的巡检试用,当架空的燃气管、调压箱、调压阀等出现的燃气泄漏时,该仪器可快速探测到并发出声光振动报警,实用性强。

4 总结

本文将 TDLAS 技术和激光遥测技术相结合,设计了手持激光甲烷遥测仪,可对道路两侧燃气输配管线、架空管道、小区高楼厨房燃气泄露以及石油、石化等行业可能存在燃气管道泄漏的场所进行巡检。经过模拟测试与燃气公司使用表明,该仪器携带使用方便、遥测距离远、响应快速,灵敏度高,能够满足现代燃气管网巡检快速检测的需求,可在更多的城市进行推广应用,更好地保障人民生命财产安全。

参考文献:

- [1] 杨仁弟. 基于车载开放光路 TDLAS 的甲烷检测技术研究 [D]. 济南: 山东大学博士论文, 2018:1-8.
- [2] 王书潜, 贾林涛, 郭东歌等. 基于开放式激光甲烷气体探测系统的研究 [J]. 激光杂志, 2013, 34(3):39-40.
- [3] 郭东歌, 陈海永, 贾林涛等. 车载激光甲烷遥测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(7):9-13.
- [4] 宫卫华. 基于开放光路可调谐半导体激光吸收光谱技术气体遥测关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学硕士论文, 2019:7-13.
- [5] 陈海永, 王书潜, 郭东歌等. 二级恒温控制半导体激光器: 中国, CN102778906A[P]. 2012-11-14.
- [6] 陈海永, 郭东歌, 武传伟等. 一种可监测波长的激光气体探测系统: 中国, CN214953024[P]. 2021-11-30.