

车载甲烷巡检仪的光路优化设计与系统实现

李志刚¹, 陈海永¹, 詹自力², 王书潜¹, 郑国锋¹

(1. 河南汉威电子股份有限公司 国家认定企业技术中心, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 多次反射腔体是激光吸收光谱气体传感器的核心组件, 其结构和性能直接影响到整个设备的灵敏度和稳定性. 分析了 White 腔、Herriott 腔、CEAS 腔等国内外主要应用的多次反射腔体的设计方案和工作原理, 设计和制作了 96 次反射腔体, 并应用在车载激光甲烷巡检仪上. 通过燃气公司的实际应用表明, 该设备极大地提高了燃气巡检的效率, 缩短了燃气巡检的周期, 有效地减少了爆燃事故的发生.

关键词: 激光吸收光谱技术; 多次反射腔体; White 腔; Herriott 腔; 车载; 燃气泄漏巡检仪

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.012

0 引言

近几年来, 由于天然气管道泄漏导致事故频发, 造成人民生命财产的巨大损失. 目前, 国内燃气管网主要通过人工携带便携式沿燃气铺设管道巡检, 效率低, 巡检周期长. 为了预防和避免事故的发生, 需要研发一套高效的甲烷泄漏检测系统, 迅速准确地测量道路上甲烷的含量.

采用激光光谱吸收技术研制的巡检仪^[1]具有反应速度快、灵敏度高、抗气体干扰等特点, 适用于车载巡检设备快速、高效的需要. 多次反射腔体是这种巡检仪的核心组件, 其性能将影响到整个设备的灵敏度和稳定性.

当一束光强为 I_0 的光通过待测气体时, 如果光源覆盖该待测气体的吸收谱线, 在相应的谱线处发生光强衰减. 根据比尔-朗伯特 (Beer-Lambert) 定律^[2], 出射光强 I 与入射光强 I_0 关系为

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

式中: $\alpha(v)$ 为气体吸收系数; L 为光通过待测气体的光程; C 为待测气体的浓度. 在近红外波段, 气体的吸收系数很小, 满足 $\alpha(v)CL \ll 1$, 将式(1)傅里叶展开为

$$I_{2f} \propto \alpha(v)CL. \quad (2)$$

式中: I_{2f} 为二次谐波信号. 可以看出, 二次谐波信号和浓度成正比, 同时也与气体通过的光程成正

比. 为了提高检测灵敏度, 需要增加激光通过气体的光程^[3-4]. 为了增加通过气体的激光光程, 出现了几种多次反射腔体, 主要有 White 腔^[5]、Herriott 腔^[6-9]以及 CEAS 腔^[10]等. White 腔采用 3 个曲率半径相同的球面凹面反射镜, 光束在 3 个反射镜之间来回反射, 适用于大孔径红外光的入射, 由于需要采用 3 个反射镜, 结构稳定性较差. 传统的 Herriott 腔采用两个曲率半径相同的球面凹面反射镜, 同轴平行放置. 若光线以特定角度入射, 就会在两个镜面间来回反射. CEAS (cavity-enhanced absorption spectroscopy) 腔是近年来出现的一种腔体, 由于不适用车载设备, 此处不再研究. Herriott 腔仅需要两个反射镜, 结构简单, 并且对机械扰动具有固有的稳定性. 但是传统的 Herriott 腔存在结构上的缺陷, 笔者对其进行改进, 作为车载甲烷巡检仪的多次反射光路.

1 多次反射腔体设计

两个凹面反射镜同轴平行放置, 当满足以下条件时, 光线就会在两个镜面间来回反射. 经过 N 次反射后, 从入射点射出, 光斑在镜面上呈圆周均匀分布.

$$N \cdot \theta = 2m\pi. \quad (3)$$

$$d/R = 1 - \cos \theta. \quad (4)$$

$$N = 2pm + k. \quad (5)$$

收稿日期: 2015-11-10; 修订日期: 2015-12-26

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2013BAD17B04)

通信作者: 詹自力 (1965—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事纳米材料和气敏元件研究, E-mail: zhanzili@zzu.edu.cn.

式中: N 表示总的反射次数; θ 为相邻次数光斑之间的夹角(投射到同一个反射镜上); m 为完成 N 次反射需要走过 m 个 2π 周期; d 为两个凹面镜之间的距离; R 为凹面镜的曲率半径; p 为每个镜子上每个周期里的光斑数; $k = \pm 2, \pm 4, \cdots, \pm 2n$.

采用曲率半径 $R = 1\,300\text{ mm}$ 的凹面镜,每个周期里有 5 个点,即 $p = 5$. 同一个镜面上两个相邻光斑之间的夹角为 2θ ,假设之间分布 10 个点,则式(6)成立,取 $m = 10$,则变为式(7).

$$\theta \cdot 2p - 360^\circ = \frac{2 \cdot \theta}{m}. \tag{6}$$

$$\theta \cdot 10 - 360^\circ = \frac{1}{5} \cdot \theta. \tag{7}$$

根据式(5)得出 $\theta = 36.73^\circ$,根据式(4)得出 $d = 258.162\,3\text{ mm}$.

综上可知, $R = 1\,300\text{ mm}$, $d = 258.162\,3\text{ mm}$, $\{N, m, k, p\} = \{98, 10, -2, 5\}$.

根据 Herriott 腔体的重入条件,光线以 36.73° 入射,则光线在两个反射镜中间反射 98 次以后,从入射点射出. 如果在入射镜的适当位置开孔,则可以在光线进入入射点之前把光线引出. 否则采用传统的 Herriott 腔体,由于入射点和出射点是在同一点,且二者的夹角很小,若要避免准直器和探测器在结构上的干涉,如图 1 所示,则 L 就要很大,结构件显得笨重. 因此,在 $N = 96$ 的地方开孔,提前把光线引出. 这样,腔体的长度方向就可以短一些.

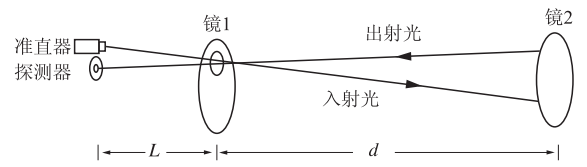


图 1 准直器与探测器在同一端
Fig. 1 The collimator and detector at the same end

采用上述方案制作多次反射腔体,在入射孔的位置安装光纤准直器,出射孔的位置安装探测器.

2 车载激光甲烷巡检仪系统设计

该系统由车前采气单元、车内检测单元、车内控制器、远程监控中心 4 部分组成,如图 2 所示. 车前采气单元把道路上的空气吸到车内检测单元内,车内检测单元检测空气中甲烷气体的浓度信息,车内控制器显示、播报浓度信息,并通过无线网络把巡检信息上传至远程监控中心. 一旦发现泄漏事件,远程监控中心能及时协调处理.

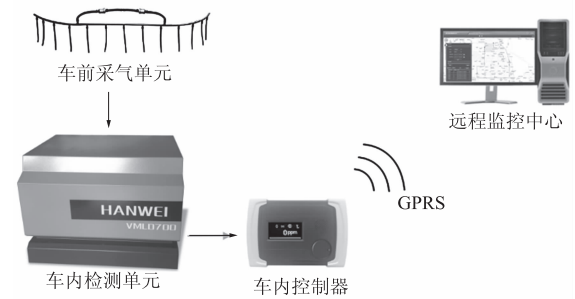


图 2 系统组成图
Fig. 2 Photo of system composition

系统设计框图如图 3 所示,可分为气路设计、光路设计和电路软硬件设计等部分,下面分别介绍.

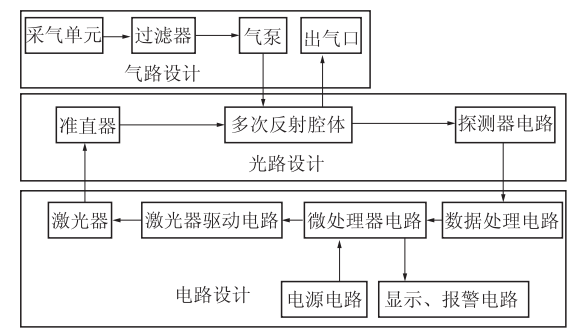


图 3 系统设计框图
Fig. 3 System design block

2.1 气路设计

气路设计主要包括车前采气单元设计、气泵选型、过滤器选型等部分. 车前采气单元根据汽车前保险杠量身定制,具有流线型的外观,便于巡检员驾驶.

由于空气中含有灰尘和水汽,如果被吸入进多次反射腔体,会污染镜面,导致反射镜的反射率降低,因此需要对灰尘和水汽进行过滤.

2.2 电路硬件设计

激光器驱动电路产生调制信号,驱动激光器产生所需波长的激光. 激光通过光纤耦合到多次反射腔体的光纤准直器里,在腔体里经过多次反射后,到达接收端. 接收端的光电转换电路如图 4 所示,包括光电转换与前置放大电路.

光信号包含了气体的浓度信息,经光电二极管转换成电信号. 前置放大电路的目的是把光电二极管输出的电流信号转换成电压信号. 运算放大器是前置放大电路的核心部件,其性能指标,如频率响应、开环增益、输入偏置电流以及噪声性能均对前置放大电路有重要影响. R 是反馈电阻,通

过改变 R 值,改变光信号转换为电信号的大小.

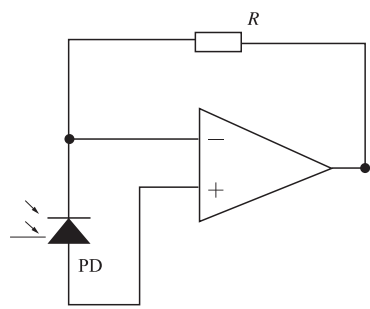


图 4 光电转换电路图

Fig. 4 Diagram of photoelectric conversion circuit

经过光电转换后的电压信号,通过如图 5 所示的锁相放大电路,主要功能是用来提取反映气体浓度信息的二次谐波信号.锁相放大电路^[11-12]是利用互相关原理设计的同步相干检测器,通过被测信号与参考信号的比较,提取与参考信号同频的信号分量.因此能大幅度地抑制噪声,提高探测灵敏度和信噪比.由于要提取的是正弦波的二次谐波信号,因此参考信号采用的是正弦波的二倍频信号.

二次谐波信号经过滤波电路处理以后,由 AD 转换器转换为数字信号,送给微处理器进行处理,然后通过显示部分显示输出.当有气体泄漏时,就会发生共振吸收,通过提取二次谐波信号,根据式(2)就可计算出气体的浓度.

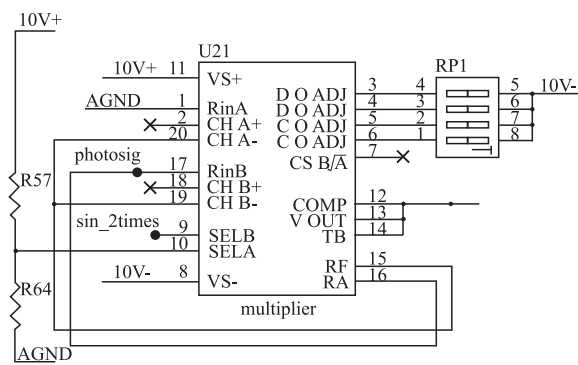


图 5 锁相放大电路

Fig. 5 Diagram of lock-in amplifier circuit

2.3 电路软件设计

微处理器部分的主要功能是测量气体的浓度信息,其程序流程图如图 6 所示.

显示部分的主要功能是接收、显示 MCU 数据,并在浓度达到报警值时发出声光报警,其程序流程图如图 7 所示.

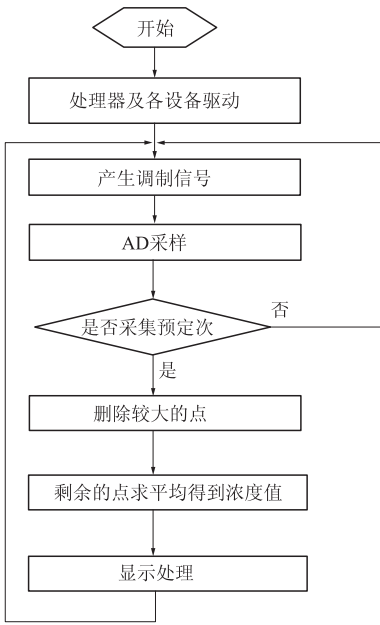


图 6 微处理器工作流程图

Fig. 6 Microprocessor work flow chart

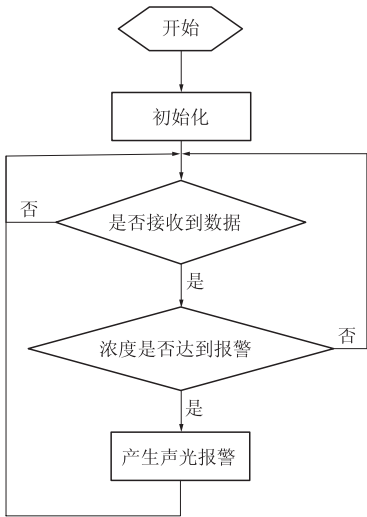


图 7 显示程序流程图

Fig. 7 Display program flow chart

3 试验与结果分析

采用上述系统,在实验室的静态测试结果如表 1 所示.由表 1 可以看出,实际的测试结果与标准气浓度基本一致,该系统的检测精度为 1%.

表 1 实验室测试结果

Tab.1 Test results in the lab

序号	标气体积分数/ 10^{-6}	测量结果/ 10^{-6}
1	5	5
2	20	19.8
3	500	505
4	1 000	990

把上述系统安装在汽车上,在某燃气公司进

行实际的巡检工作. 在埋有燃气管道的道路上以 30 km/h 的速度行驶, 巡检仪报警, 体积分数为 5×10^{-6} . 经过在地面上钻眼、取样等进一步排查, 确认为中压管线断裂. 燃气公司立刻派出施工队进行抢修, 避免了爆燃事故的发生.

该检测系统跟传统的手持检测仪相比, 提高了测试效率和测试的准确性, 并且降低了人工检测成本. 采用人工巡检需要 4 个月才能把该城市的燃气管道巡检一遍, 采用车载激光甲烷巡检仪只需要一周时间就能完成, 缩短了巡检周期, 能够尽早发现微小泄漏并及时抢修, 把爆燃事故扼杀在萌芽状态.

4 结论

笔者设计了 96 次反射腔体, 该腔体灵敏度高, 即使是微小的泄漏也能检测到; 由于采用激光光谱吸收技术, 其选择性好, 只对甲烷有反应, 能有效避免汽车尾气等其它气体的干扰. 安装有车载甲烷泄漏检测系统的汽车在行驶时, 实时对道路两侧的燃气管道进行监测, 提高燃气巡检效率, 缩短巡检周期, 更好地保障燃气管网运行的安全, 减小或避免燃气管网爆炸、起火事件的发生.

参考文献:

- [1] 尚中锋, 张青云, 陈海永, 等. 基于车载激光甲烷泄漏检测系统[C]//2011 中国仪器仪表与测控技术大会论文集. 北京: 中国仪器仪表学会, 2011.
- [2] 王汝琳, 王咏涛. 红外检测技术[M]. 北京: 化学工

业出版社, 2006: 27 - 29.

- [3] BRASSINGTON D J. Tunable diode laser absorption spectroscopy for the measurement of atmospheric species [J]. Spectroscopy in environmental science, 2001, 55: 2083 - 2089.
- [4] BARES W L. Tunable Fiber laser source for methane detection at 1.68 μm [J]. Boston. Proceedings of SPIE, Chemical, Biochemical and environmental fiber sensors, 1992, 9(9): 98 - 109.
- [5] WHITE J U. Long optical paths of large aperture [J]. Opt Soc AM, 1942, 32(5): 285.
- [6] HERRIOTT D R. Kogelnik H, Kompfner R. Off-axis paths in spherical mirror interferometers [J]. Appl Opt, 1964, 3(4): 523 - 526.
- [7] HERRIOTT D R, Schulte H J. Folded optical delay lines [J]. Appl Opt, 1965, 4(8): 883 - 889.
- [8] PIERCE J R. Theory and design of electron beams [J]. Van Nostrand, 1954, 6(2): 194 - 197.
- [9] CHRISTOPHER G, CHRISTOPHER R. Multilaser herriott cell for planetary tunable laser spectroscopy [J]. Appl Opt, 2007, 46(28): 6923 - 6935.
- [10] BAER D, PAUL J, GUPTA M, et al. Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated cavity output spectroscopy [J]. Appl Phys, 2002, 75(2/3): 261 - 265.
- [11] 高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 154 - 182.
- [12] 张厥盛, 郑继禹, 万心平. 锁相技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 5 - 10.

Optical Path Optimization Design and System Implementation of the Vehicle-mounted Methane Inspection Instrument

LI Zhigang¹, CHEN Haiyong¹, ZHAN Zili², WANG Shuqian¹, ZHENG Guofeng¹

(1. National-recognized Enterprise Technology Center, Henan Hanwei Electronics Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Multiple-pass cell is the core component of the laser absorption spectrum gas sensor, and its structure and performance directly affect the sensitivity and stability of the whole device. This paper analyzes the design scheme and the working principle of the mainly used multiple pass cells both at home and abroad, such as White cell, Herriott cell, CEAS cell etc.. This papers also designs and manufactures a 96 times cell, and applies it in a vehicle-mounted laser methane inspection instrument successfully. The practical application of the gas company shows that the instrument greatly improves the efficiency of gas inspection, shortens the period of gas pipeline inspection, effectively reduces the occurrence of deflagration accident.

Key words: TDLAS; multiple pass cell; White cell; Herriott cell; vehicle-mounted; natural gas leakage detection