

文章编号: 1001-9014(2010)06-0410-05

# 一种适于直升机平台的天然气管道泄漏监测技术

潘明忠, 亓洪兴, 李正文, 杨俊, 杨一德, 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:** 针对我国日益凸显的天然气管道泄漏监测的实际需求, 提出了一种适于直升机平台的基于近红外波长调制吸收光谱的天然气管道泄漏监测技术, 阐述了该技术的基本原理, 论证了该技术对直升机平台的工程适用性, 研制了一套室外试验研究平台, 利用试验数据证明了该技术的工程可行性。

**关键词:** 天然气管道泄漏; 机载监测; 波长调制吸收光谱技术; 谐波探测

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A

## AIRBORNE INSPECTION OF NATURAL GAS PIPELINE

PAN Ming-Zhong, QI Hong-Xing, LI Zheng-Wen, YANG Jun, YANG Yi-De, SHU Rong  
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** An airborne inspection technique of natural gas transport pipeline based on the near infrared wavelength modulation spectroscopy is proposed. The physical principle of this technique was interpreted. The applicability of this technique to the helicopter station was discussed. The field experiments were carried out on a home-made system to validate the engineering feasibility of the technique.

**Key words:** natural gas pipeline leak; airborne inspection; wavelength modulation spectroscopy; harmonic detection

### 引言

根据国家《天然气管网布局及“十一五”发展规划》, 到 2010 年中国将基本形成覆盖全国的天然气基干管网, 管道总长度将达到 4.4 万公里。如此绵长的管道网络, 由于管道老化、地质结构变化等因素造成的天然气管道泄漏事故将不可避免。统计数据表明, 天然气在通过管道输运过程中的泄漏量大约占到输气总量的 10%。由于天然气是可燃性气体, 天然气管道泄漏给国家造成直接经济损失的同时, 也给人民群众的生命财产安全带来严重威胁; 此外, 天然气的主要成分甲烷是典型的温室气体, 其温室效应大约是相同浓度二氧化碳的 20 倍, 因此天然气管道的大量泄漏会加剧地球温室效应。正是基于这些原因, 世界各国政府在积极建设天然气管道的同时, 也非常重视天然气管道泄漏监测工作。资料表明<sup>[1,2]</sup>, 西方发达国家早在 2004 年就已经开始研究机载天然气管道泄漏监测方法以代替传统的手持仪器监测方法, 并研制成功了相应的机载监测设备, 有

的设备已经投入商业运营。国外的研究表明, 采用机载监测方法取代传统手持仪器监测方法可以使监测成本降低 40%。查新表明, 国内在天然气管道泄漏监测方面也做了很多工作, 但均局限于手持式和近距离车载监测<sup>[3,4]</sup>。鉴于我国天然气管道业务的迅猛发展, 及早开展机载天然气管道监测技术的研究具有显著的社会效益和经济效益。

基于激光波长调制吸收光谱技术提出了一种天然气管道泄漏监测方法, 首先阐述了该方法的技术原理, 然后论述了该方法对直升机平台的适用性, 最后通过搭建试验平台初步验证了该方法的工程可行性。

### 1 技术原理

文中提出的天然气管道泄漏监测方法是一种光学方法, 所依据的物理基础是气体分子和光的某种相互作用, 具体是指气体吸收特定波长的光子, 使得透射光强度相对于入射光强被衰减, 光强度衰减量和气体含量之间具有确定的量化关系, 通过技术手段测量光强度的衰减量便可以得到气体的含量信

收稿日期: 2009-07-15, 修回日期: 2010-06-08

基金项目: 国家 863 计划(2007AA06Z222)资助

作者简介: 潘明忠(1982-), 男, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要从事机载遥感及成像光谱技术研究, E-mail: panmingzhong2002@sina.com

Received date: 2009-07-15, revised date: 2010-06-08

息.光强度衰减量和气体含量之间的量化关系通常由 Lambert-Beer 定律来表达:

$$P = K S \exp[-2\alpha(\nu)C] \quad (1)$$

式中  $S$  代表入射光强度,  $P$  代表气体吸收以后测量得到的光强度,  $K$  代表测量系统的光学收集效率,  $\alpha(\nu)$  代表光频率为  $\nu$  时的光学吸收系数,  $C$  代表气体吸收的路径含量, 对于机载天然气管道泄漏监测, 路径含量的物理意义是指从飞机平台到管道地面之间往返距离范围内的气体含量和路径长度的乘积, 其单位通常用 ppm-m 来表示. 需要说明的是, 文中的气体特指天然气的主要成分甲烷气体, 通过探测甲烷气体来监测天然气管道泄漏是目前国际上的通行做法<sup>[2,3]</sup>.

根据式(1), 特定波长的光源是实现气体探测的必要条件, 考虑到机载平台的遥测特点, 激光光源是目前唯一的选择, 选择分布反馈式半导体(DFB)激光器, 工作波长在  $1.653\mu\text{m}$  附近可调谐. 由于  $1.653\mu\text{m}$  位于甲烷气体的泛频吸收带, 分子吸收截面小, 如果采用直接探测方法, 探测灵敏度不能满足远距离探测的要求. 充分利用 DFB 激光器的波长可调谐特性, 采用波长调制吸收光谱技术来实现远距离探测. 波长调制吸收光谱技术的基本原理早在 20 世纪 70 年代就被提出, 相关理论早已成熟<sup>[5]</sup>, 只是在近年来随着各种波长可调谐激光器的技术成熟, 才逐渐被应用到实际中. 下面以 DFB 激光器为例来阐述波长调制吸收光谱技术的基本原理<sup>[6]</sup>.

DFB 激光器的波长可调谐特性基于驱动电流对其输出波长的影响, 通过注入被正弦信号调制的驱动电流来调谐激光器的输出波长, 当被调制的激光穿过待测气体时, 透射光强度可以表达为

$$P'(t) = P_0 K \left[ 1 + \eta \sin \omega t - \frac{2\alpha_0 C}{1 + x^2 \sin^2 \omega t} \right] \quad (2)$$

其中  $P_0$  代表激光器的平均功率输出,  $\eta$  代表激光器的强度调制系数,  $\omega$  代表调制频率,  $x = v_m / \delta\nu$ ,  $v_m$  代表调制频率的幅度,  $\delta\nu$  代表气体吸收线的半高宽,  $\alpha_0$  代表气体吸收线中心处的吸收系数. 把式(2)按傅里叶级数展开, 得到  $P'(t)$  的一次谐波分量和二次谐波分量的幅值分别为

$$P_1 = K \eta P_0 \quad (3)$$

$$P_2 = -2K \gamma \alpha_0 P_0 C \quad (4)$$

式(4)中的常数  $\gamma$  表达为

$$\gamma = \frac{2[2 + x^2 - 2(1 + x^2)^{\frac{1}{2}}]}{x^2(1 + x^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

根据式(3)、式(4),  $P_1$  与气体的含量无关, 而  $P_2$  与气体含量成正比, 并且两者都含有激光输出的平均功率, 因此两者相比会得到一个很有意义的式子

$$\frac{P_2}{P_1} = -2 \frac{\gamma \alpha_0}{\eta} C \quad (6)$$

即  $P_2$  与  $P_1$  的比值与气体含量成正比. 根据式(6), 首先对系统进行定标确定常数  $\gamma \alpha_0 / \eta$ , 然后通过测量  $P_2$  与  $P_1$  的值就可以得到路径含量  $C$ . 由于正常环境下大气中的甲烷含量是微量且确定的, 如果天然气管道泄漏导致地面附近形成高浓度的甲烷云团, 那么相对于正常环境下  $C$  的值会显著增大, 从而实现天然气监测的目的.

## 2 直升机平台的适用性分析

提出的天然气监测技术原理已经在海外被成功应用到手持式测量仪器中, 但由于机载平台的探测条件和手持模式的探测条件之间存在较大差异, 这种技术能否同样适用于机载平台还需要细致的论证. 文中将从探测灵敏度、动态探测能力、激光稳频、系统定标、复杂地表反射等方面给予论证.

### 2.1 探测灵敏度分析

根据式(4), 最小可探测的气体含量与最小可探测的  $P_2$  是对应的, 而最小可探测的  $P_2$  是和系统的光电转换噪声相关的, 如果纯粹基于理论计算来决定最小可探测的  $P_2$ , 势必要引入一些假定性的技术参数, 比如系统光学效率、探测器的噪声等效辐射功率、探测器前置放大器的噪声系数等, 从而使分析结果可靠性降低. 因此, 从工程可行性角度, 基于国外已经产品化的手持式探测仪器的技术参数和性能指标来论证机载平台的适用性; 由于国外产品和文中要研制的探测系统采用的关键部件(比如激光器、探测器等)都是选用国际市场上的成熟产品, 性能差别不大, 某些产品甚至是同一型号, 所以这种论证方法是科学有效的, 论证结果是可靠的. 具体参照日本 Tokyo Gas Engineering 公司的 SA3C05A 型甲烷气体探测仪产品, 该设备采用的 DFB 激光器波长为  $1.653\mu\text{m}$ , 输出功率为  $10\text{mW}$ , 探测器为 InGaAs PIN photodiode, 接收望远镜口径为  $100\text{mm}$ , 探测距离  $30\text{m}$ , 探测灵敏度为  $100 \sim 10000\text{ppm-m}$ .

式(4)中光学收集效率  $K$  可以进一步表达为

$$K = \frac{A \rho \sigma}{R^2} \quad (7)$$

其中  $A$  代表接收望远镜的面积,  $\rho$  代表目标的微分反射率,  $\sigma$  代表光学系统的光学透过率,  $R$  代表探测

仪器和目标的距离. 则式(4)进一步表达为

$$P_2 = -2 \frac{A}{R^2} P_0 \gamma \alpha_0 \rho \sigma C \quad (8)$$

为了适应机载平台远距离探测条件,机载探测系统的激光器功率和接收望远镜的口径相对于手持式产品要适当调整(其他参数相同),从工程可行性角度分析,15mW 的 DFB 激光器目前可以从市场上得到,320mm 口径的反射式望远镜也是较容易设计和加工的. 假定基于这两项参数调整的机载探测系统如果也要达到和 SA3C05A 型产品相同的探测灵敏度,根据式(8)和 SA3C05A 型产品的技术参数可以推算出机载系统能够探测的有效距离为 117m.

## 2.2 动态探测能力

机载平台始终处于运动状态,这一点和手持式仪器的探测条件有很大不同. 手持式仪器的探测目标是静止的,而机载仪器的探测目标是“稍纵即逝”的;这就要求机载仪器必须具备足够快的响应速度,能够实时反映机下点的甲烷浓度. 首先需要明确,天然气管道的泄漏会在泄漏点附近形成甲烷云团,机载监测仪器发射的激光束要穿过甲烷云团到达地面,经地面反射后再次穿过甲烷云团到达监测仪器的接收系统,如图 1 所示. 文中提出的机载监测方法中,由于激光器工作于连续输出模式,所以可以对从地面反射回来的激光回波信号采取等时间间隔采样,只要采样速率足够高就可以保证对甲烷云团的多次采样;根据式(8),甲烷含量的突然增加会直接反映到激光回波强度的二次谐波幅值上,由于云团中心的甲烷含量最大,所以反映到二次谐波幅值上也是最大的. 直升机的巡航速度通常在 100km/h 左右,即大约 28m/s,管道泄漏形成的甲烷云团直径通常在 1~3m,也就是说,激光束在甲烷云团中存在的时间大约在 0.03~0.1s 范围,考虑短波红外探测器的性能参数,谐波检测所采用的相关检测时间常数通常在 10ms 左右就可以得到较高的探测信噪比,因此能够保证该技术的动态探测能力.

## 2.3 激光稳频

式(2)成立的前提条件是激光器的平均波长必须被锁定在甲烷气体的吸收线中心附近;而另一方面,DFB 激光器的波长容易受温度的影响而漂移,漂移系数大约是 0.1nm/K,所以必须考虑温度对探测的影响. 手持式测量仪器通常工作在比较稳定的温度环境中,常规的基于温度传感器的闭环温控电路可以把温度稳定在  $\pm 0.1\text{K}$  范围内,也就意味着可以把激光波长漂移控制在大约  $\pm 0.01\text{nm}$  范围内;大

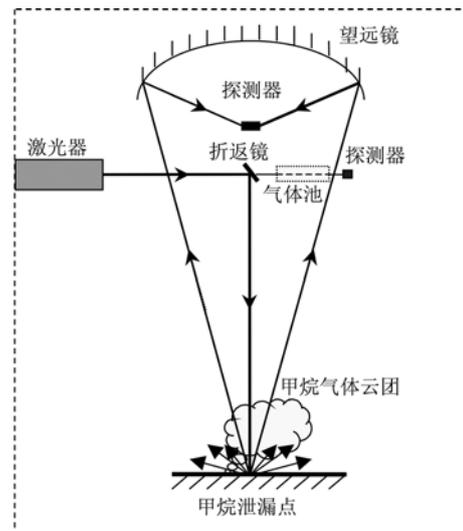


图 1 机载监测仪器工作原理

Fig. 1 The principle of airborne monitoring instrument

气压条件下甲烷气体的吸收线半高宽大约是  $0.1\text{cm}^{-1}$  (约  $0.03\text{nm}$ ),  $\pm 0.01\text{nm}$  的波长漂移虽然会影响探测结果的稳定性,但气体仍然是可以被探测的. 由于直升机遥测平台通常是非密闭环境,飞行过程中强气流的扰动使得常规的单纯基于温度传感器的闭环温控电路已经很难保证  $\pm 0.1\text{K}$  的温控精度,从而使得激光波长在一部分时间里可能是偏离气体吸收谱段的,或者说是无法进行气体探测的,这一方面大大降低了机载作业的飞行效率,另一方面会在天然气管道监测路线上形成盲区. 解决这一问题的途径是在监测仪器中增加一个参考通道,通过光学反馈来实现温度控制,具体实现原理如图 1 所示. 参考通道由充定量甲烷气体的气体池和探测电路两部分组成,激光器输出的很小一部分能量通过分光镜进入气体池,然后被光探测器探测;由于激光在传输过程中被甲烷吸收,从光探测器输出中可以得到气体吸收产生的一次谐波和二次谐波信号强度;谐波信号的强度和激光的平均波长是一一对应的,而平均波长又是和激光器温度息息相关的,所以可以利用一次谐波和二次谐波的强度作为反馈信号来控制激光器温度,使其稳定在一定范围内,以达到机载探测的要求.

## 2.4 系统定标

根据式(6),为了准确探测天然气管道泄漏点附近甲烷云团的含量,除了待测量(激光回波的一次和二次谐波幅值)之外,常数  $\gamma \alpha_0 / \eta$  也要确定,这就是系统定标,其中  $\alpha_0$  是和气体的温度、压强等条件相关的常数, $\gamma$  和  $\eta$  是和激光器调制参数相关的

常数. 系统定标的基本原则就是希望定标时的探测条件和实际工作时的探测条件尽量一致, 这里的探测条件指的是气体的压强、温度参数, 以及与激光器调制相关的电路参数. 要确定这三个定标常数, 对机载平台监测仪器来说通常有两种途径, 一种是在地面上利用标准气体试验获取, 另一种是通过机上定标装置获取; 根据系统定标的基本原则, 机上定标是较好的选择, 原因有两点: 一是机上定标装置可以借用 2.3 节中提到的参考通道; 二是机上定标可以保证  $\gamma$  和  $\eta$  两个参数在定标和实际工作时的一致性; 另外, 气体气压参数和温度参数不一致的影响可以通过地面温度和机上温度之间的差异来补偿.

### 2.5 复杂地面反射

机载监测仪器不同于手持式仪器的一个显著标志是飞机飞行过程中各种地面反射物的剧烈变化, 不同反射物对应式(7)中不同的微分反射率, 从而直接对应着式(3)、式(4)所表达的激光回波一次谐波和二次谐波信号的幅值, 但是从式(6)可以看出, 两者的比值与微分反射率无关, 因此在机载监测作业过程中各种地面反射物的剧烈变化不会对甲烷含量探测结果产生显著的影响, 只会影响到激光回波一次谐波和二次谐波信号幅值的探测信噪比.

## 3 工程可行性分析

为了验证所提出的机载天然气管道监测技术的工程可行性, 自行搭建试验平台并开展了室外甲烷气体探测试验研究.

试验平台如图 2 所示, DFB 激光器输出波长为  $1.653\mu\text{m}$  的激光, 经过光纤准直器和  $45^\circ$  反射镜后平行射出到达 35m 远外的反射面, 散射回来的光被望远镜(口径 180mm)接收会聚于光探测器; DFB 激光器由美国 ILX Lightwave 公司生产的 LDC-3724B 控制器来驱动, 外部正弦调制信号由凌华公司的

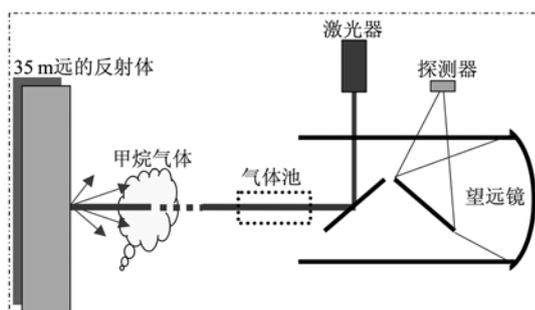


图 2 试验平台工作原理

Fig. 2 The principle of test platform

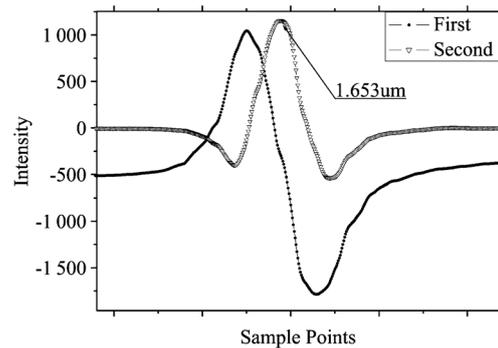


图 3 谐波强度随激光平均波长的变化

Fig. 3 The variety of harmonic intensity with laser average wavelength

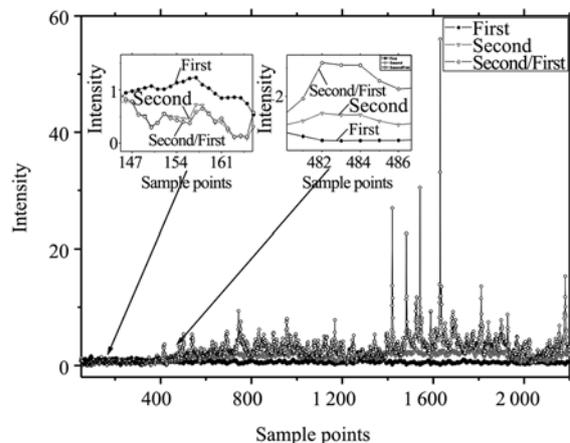


图 4 室外试验数据分析结果

Fig. 4 The analytical results of outdoor test data

DAQ-2005AD/DA 卡产生, 光探测器采用美国 GPD 公司生产的 InGaAs 光电二极管, 光探测器输出的电信号由 DAQ-2005AD/DA 卡采集后输送给计算机处理和保存.

为了验证试验平台的原理可行性, 在激光出射光路上放置一个充有浓度为 25% 甲烷气体的气体池, 如图 2 中虚线框所示, 通过手动由小到大调节激光器驱动电流的直流分量, 改变激光器输出的平均波长, 获取激光回波一次谐波 (First) 和二次谐波 (Second) 强度随激光器平均波长变化的试验曲线, 如图 3 所示, 其中二次谐波的峰值是在激光平均波长为  $1.653\mu\text{m}$  时获得的, 这充分证明了平台的原理可行性.

除去气体池, 在 35m 远外的反射面附近放置甲烷储气瓶, 利用导气软管模拟甲烷气体泄漏, 获取的试验数据如图 4 所示, 左边的采样点对应无甲烷泄漏的情况, 逐点往右泄漏量逐渐增大, 可以看到一次谐波 (First) 的强度起伏很小, 二次谐波 (Second) 和比

值(Second/First)强度显著表征了甲烷的泄漏量;在右边的采样点中通过快速“开关”气体模拟了动态气体监测,证明了该方法的实时探测能力(采样点间隔10ms)。根据试验平台的探测条件(激光功率5mW、口径180mm)和待研制的机载仪器的参数(激光功率15mW、口径320mm),可以推断机载仪器能够在107m的探测距离上获取如图4所示的探测信噪比。

#### 4 结论

鉴于我国将要面临的天然气管道泄漏监测的繁重任务,提出了一种适于直升机平台的监测技术,基于传统的波长调制吸收光谱原理,通过机载平台的适用性改进,该技术完全可以满足直升机平台的应用要求,试验研究结果也充分证明了这一点。

#### REFERENCES

[1] Uehara K, Tai H. Remote detection of methane with a

1.66 $\mu\text{m}$  diode laser [J]. *Applied Optics*, 1992, **31** (6): 809—814.

[2] Ikuta K, Yoshikane N, Vasa N, *et al.* Differential absorption lidar at 1.67 $\mu\text{m}$  for remote sensing of methane leakage [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38** (1A): 110—114.

[3] FAN Hong, GAO Xiao-Ming, BAO Jian, *et al.* Study on remote sensing of methane leakage using a tunable diode laser [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (樊宏,高晓明,鲍健,等.天然气管道泄漏可调谐二极管激光遥感探测的研究. *光谱学与光谱分析*), 2006, **26** (8): 1423—1427.

[4] WANG Shi-Mei, LIU Wen-Qing, LIU Jian-Guo, *et al.* The study of remote sensing CH<sub>4</sub> concentration based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (汪世美,刘文清,刘建国,等.基于可调谐二极管激光吸收光谱遥测CH<sub>4</sub>浓度. *光谱学与光谱分析*), 2006, **26** (2): 221—224.

[5] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys.*, 1981, **26** (3): 203—210.

[6] Jin W, Xu Y Z, Demokan M S, *et al.* Investigation of interferometric noise in fiber-optic gas sensors with use of wavelength modulation spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 1997, **36** (28): 7239—7246.

## 全国第十三届红外加热暨红外医学 发展研讨会征文通知

由中国光学学会红外与光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、国家红外及工业电热产品质量监督检验中心、锦州市光学学会等联合主办的全国第十三届红外加热暨红外医学发展研讨会,定于2011年10月在湖北省宜昌市召开。现将本次会议的征文内容通知如下:

#### 一、应征论文范围

红外辐射加热技术在国民经济中地位、作用及发展前景的综述、评论文章;  
红外辐射与物质相互作用,红外加热理论与机理的研究;  
红外辐射加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究;  
各种红外辐射加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析;  
红外加热测试技术、物质的红外光谱及相关技术研究;  
红外辐射加热技术在节能减排方面的研究成果;  
红外辐射加热在生物学与医学中的应用等;  
红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向;  
红外医学的临床理论研究,临床应用报告及相关的激光、微波、毫米波研究与应用。

#### 二、截至时间

应征论文须在2011年8月30日前以电子邮件方式将500~800字的论文摘要发送到:zengyu18@sina.com,并注明作者详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码。经审稿录用的论文摘要集,将由《红外技术》编辑部、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社编辑出版。

#### 三、联络方式

会议筹备组的通信地址:武汉市东西湖区金银湖东二路5号,国家红外及工业电热产品质量监督检验中心(邮政编码:430048);联系人:曾宇教授;电话:027-68853723、85808990,传真:027-85795691, e-mail: zengyu18@sina.com。

全国第十三届红外加热暨红外医学  
发展研讨会筹备组