

# 基于激光吸收光谱技术天然气管道泄漏 定量遥测方法的研究\*

张帅<sup>1)</sup> 刘文清<sup>1)†</sup> 张玉钧<sup>1)</sup> 阮俊<sup>1)</sup> 阚瑞峰<sup>1)</sup> 尤坤<sup>1)</sup>  
于殿强<sup>2)</sup> 董金婷<sup>2)</sup> 韩小磊<sup>2)</sup>

1) (中国科学院环境光学与技术重点实验室, 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

2) (胜利油田胜利勘察设计院有限公司, 东营 257026)

(2011年5月6日收到; 2011年6月15日收到修改稿)

报道了基于激光吸收光谱学原理的天然气管道泄漏移动遥测技术, 通过模拟天然气泄漏实验, 分析了移动遥测的关键技术问题. 为了定量遥测天然气管道微量泄漏, 引入一个和剩余幅度调制 (RAM) 等值反相的信号对偏差进行补偿, 降低 RAM 对谐波信号的影响, 提高系统检测灵敏度. 针对遥测回波吸收光谱特征, 提出了改进软阈值小波去噪法, 就提高系统信噪比而言, 比传统软阈值去噪法高 2 倍多, 同时对二次谐波 ( $2f$ ) 信号形状也有很好的保留, 通过探测限计算, 系统移动遥测灵敏度达到 80 ppm/m.

**关键词:** 激光吸收光谱技术, 天然气管道泄漏, 剩余幅度调制, 改进软阈值小波去噪法

**PACS:** 07.07.Df, 07.57.Ty

## 1 引言

天然气开发和利用日益受到重视, 但是随着管道增多, 运行时间增长, 管壁受到冲刷腐蚀及人为破坏等原因, 天然气管道泄漏事故频频发生. 在管道发生泄漏后, 一般会引起火灾和爆炸, 造成环境污染, 对人民生命财产安全造成了巨大威胁. 目前天然气管道泄漏检测技术主要包括电缆光纤泄漏检测法、声学泄漏法、基于管道模型泄漏检测法、压力梯度法、质量流量平衡法、负压波方法、天然气管道的内部漏磁检测<sup>[1]</sup>、激光遥测技术等方法. 天然气管道泄漏检测技术是多学科知识的综合, 各种方法有自己的特点、优点和缺点, 就激光遥测天然气管道泄漏主要包括 Fourier 变换红外光谱 (FTIR) 技术、差分吸收激光雷达技术及可调谐半导体激光吸收光谱技术<sup>[2,3]</sup>. 虽然 FTIR 能同时实现多种组分的测量, 但是 FTIR 系统的检测

灵敏度低, 限制了对微量气体泄漏检测的能力, 更重要的是 Fourier 变换计算耗时, 探测系统需要液氮制冷, 而且价格昂贵, 不利于工业实际使用. 差分吸收激光雷达技术利用激光发射出波长相近的两束短脉冲激光, 其波长选择在待测气体的强吸收区和弱吸收区 (或无吸收), 后向散射光被望远镜汇聚接收, 得到气体吸收体信息, 从而反演待测气体浓度, 但是由于该技术在红外波段后向散射系数非常弱, 限制了可测量气体种类, 而且系统复杂、成本高, 采用的脉冲激光器必须可调谐、脉冲能量高、脉冲长度足够短. 半导体激光吸收光谱技术与激光雷达技术相同, 其区别是利用商用半导体激光器代替昂贵的脉冲激光器, 是具有高灵敏、高分辨、快速响应、远程遥测等特点的气体检测技术<sup>[4-6]</sup>.

自 2000 年以来, 人类对天然气依赖性越来越大, 天然气管道铺设范围越来越广, 同时天然气管道泄漏也带来了一系列问题, 因此发达国家先后提

\* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2008AA06Z208) 资助的课题.

† E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

出了基于机载平台的天然气管道泄漏监测技术方案,并研制出样机,开展了飞行实验,证明了基于机载平台监测技术方案的可行性和有效性.本文主要研究了在无合作目标背景下利用 1.65 μm 分布反馈式 (DFB) 激光器对甲烷气体进行在线移动式遥测,分析解决移动遥测的关键技术问题,为研制基于机载平台的遥测天然气泄漏奠定基础.

## 2 系统测量原理与实验装置

### 2.1 系统测量原理

可调谐半导体激光吸收光谱技术利用半导体 DFB 激光器的快速扫描特性实现高灵敏、快速远距离在线遥测,因 DFB 激光器所产生激光的频率很容易通过改变注入电流来控制.气体吸收遵循 Beer 定律,当强度为  $I_0$ , 频率为  $\nu$  的单色激光通过长度为  $L$  的吸收介质后,在接收端测得的强度为  $I(\nu)$ , 表示如下 [7-10]:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-\sigma(\nu)NL), \quad (1)$$

式中  $N$  为分子数密度,  $\sigma(\nu)$  为气体分子的吸收截面.当激光的中心频率  $\nu_c$  受到频率为  $\bar{\omega}$  的调制波调制时,其瞬时频率可以表示为

$$\nu = \nu_c + \delta\nu \cos(\bar{\omega}t), \quad (2)$$

式中  $\delta\nu$  是调制幅度(典型值与吸收线宽一个量级),调制频率用  $\bar{\omega}$  表示,以便与光学频率  $\nu$  区分.光通过样品池吸收后的强度可以用  $I(\nu_c)$  的余弦 Fourier 级数来表示:

$$I(\nu_c, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_c) \cos(n\bar{\omega}t). \quad (3)$$

每个谐波分量  $A_n$  可以通过锁相放大器测得:

$$\begin{aligned} A_n(\nu_c) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu_c + \delta\nu \cos \theta) \\ &\quad \times \exp[-\alpha(\nu_c + \delta\nu \cos \theta)L] \cos n\theta d\theta \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu_c + \delta\nu \cos \theta) \\ &\quad \times \exp[-\sigma(\nu_c + \delta\nu \cos \theta)NL] \\ &\quad \times \cos n\theta d\theta, \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式中  $\theta = \bar{\omega}t$ . 在理想情况下,  $I_0$  不是激光频率  $\nu$  的函数,这就意味着在不改变  $I_0$  的情况下,可以扫

描得到吸收线,同时,调制不会给  $I_0$  带来幅度调制成分.在这种情况下,(4) 式可以变为

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0}{\pi} \int_0^{\pi} \exp[-\sigma(\nu_c + \delta\nu \cos \theta)NL] \times \cos n\theta d\theta. \quad (5)$$

对于指数函数  $e^x$ , 当指数  $|x| \ll 1$  时,有:

$$e^x \approx 1 + x. \quad (6)$$

根据 (6) 式,当气体的吸收  $\sigma(\nu)NL \ll 1$  时,可得到:

$$A_n(\nu_c) = \frac{2I_0NL}{\pi} \int_0^{\pi} -\sigma(\nu_c + \delta\nu \cos \theta) \cos n\theta d\theta. \quad (7)$$

因此,每个谐波分量直接与痕量气体的浓度  $N$  成正比的.在特殊情况下,当  $\delta\nu$  远小于吸收线宽时,对上式的  $\sigma(\nu)$  进行 Taylor 级数展开,则有:

$$A_n(\nu_c) = \frac{I_0NL2^{1-n}}{n!} \delta\nu^n \left. \frac{d^n \sigma}{d\nu^n} \right|_{\nu=\nu_c}. \quad (8)$$

经过气体吸收后的激光被光电探测器接收后,利用锁相放大器可以提取出各次谐波信号的幅度  $S_n$ :

$$S_n = KA_n, \quad (9)$$

其中  $K$  是增益放大系数.实际测量中通过  $S_2/S_1$  的方式归一化光强波动,从而实现高灵敏在线遥测.

### 2.2 实验装置

系统结构如图 1 所示.选用中心波长为 1.65 μm 的 DFB 激光器作为光源,采用 1 kHz 锯齿波改变激光器注入电流实现波长快速扫描,利用 200 kHz 正弦波对波长进行调制.激光束分成三束,其中第一束经过内参考池,用于波长标定与浓度定标;第二束激光未经过气体吸收直接由高灵敏 InGaAs 探测器反相接收,作为噪声对消 [11] 的参考信号,进入具有自动增益放大功能的减法电路,该电路首先对遥测信号进行自动增益放大,因遥测回波信号强度波动激烈,在噪声对消前需要依据参考信号电平对其进行自动增益放大;第三束激光,经铠装单模光纤传输到遥测收发望远镜,回波激光经低噪声光电探测模块接收,作为减法电路的输入信号,输出信号再由锁相放大器进行解调处理,得到一次与二次的谐波信号,然后进行的数据采集与处理,定量反演遥测气体浓度.

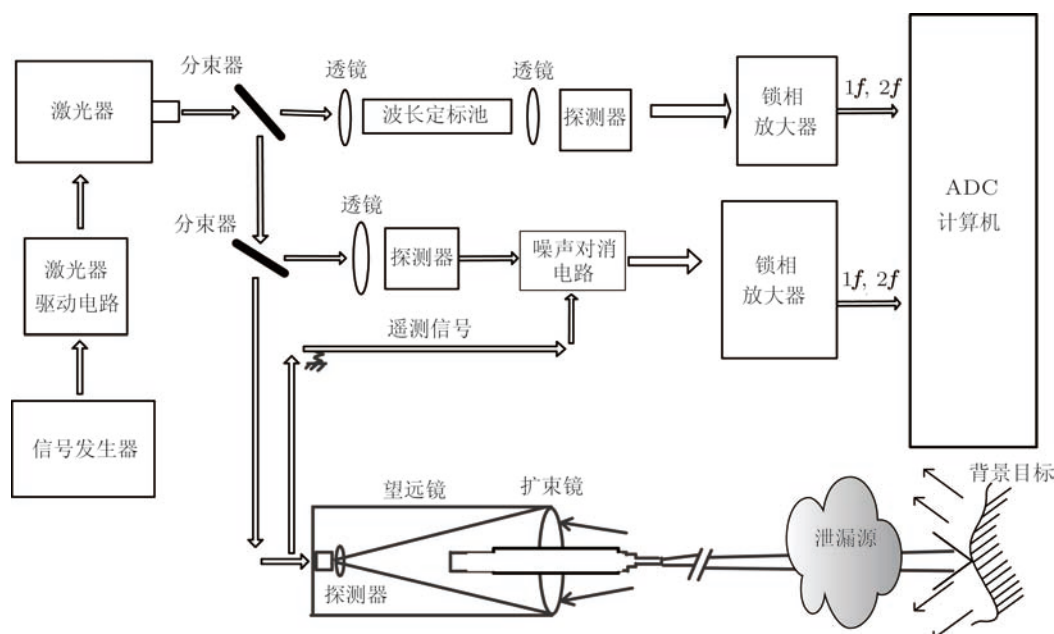


图1 激光遥测天然气管道泄漏系统结构图

### 3 噪声对消效果及分析

噪声对消的思想是引入一个和剩余幅度调制等值反相的信号,对偏差进行补偿,从而减小RAM对 $2f$ 信号的影响.图2为不同方式下噪声强度密度谱,其中曲线 $a$ 是遥测回波信号未经过减法电路,直接由锁相放大器对其解调输出的信号,因激光器中心波长调整到没有气体特征吸收处,所以曲线 $a$ 可以反映遥测回波信号的噪声强度密度频谱;曲线 $b$ 是遥测回波信号经噪声对消后再经过锁相解调后的强度密度谱曲线.通过曲线 $a$ 与 $b$ 可知,对噪声抑制平均水平达到7 dB,在1.5 kHz处噪声水平是 $0.18 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ ,理论计算值为1.4 dB以上,而在3 kHz处有26 dB的噪声抑制能力.曲线 $c$ 是内参考光路经过噪声对消后的强度密度谱曲线,噪声抑制能力达到最佳,可以看出,来自激光器的固有噪声和电源的纹波噪声通过噪声对消的方式能够得到抑制.

从图3可以看出,通过噪声对消后明显降低了RAM对 $2f$ 信号的影响.在遥测中 $2f$ 信号的背景噪声是影响系统检测灵敏度的一个主要的因素,因激光的波长调制范围至少要超过气体特征吸收线宽的2倍,在这个范围内,激光的功率/电流调制特性存在一个微弱的非线性,这个非线性导致背景

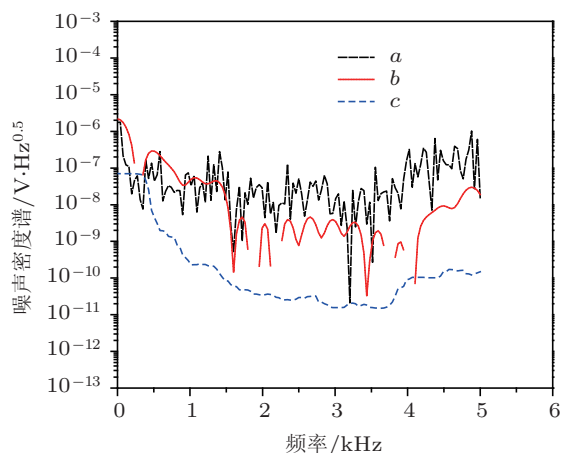


图2 噪声密度谱曲线

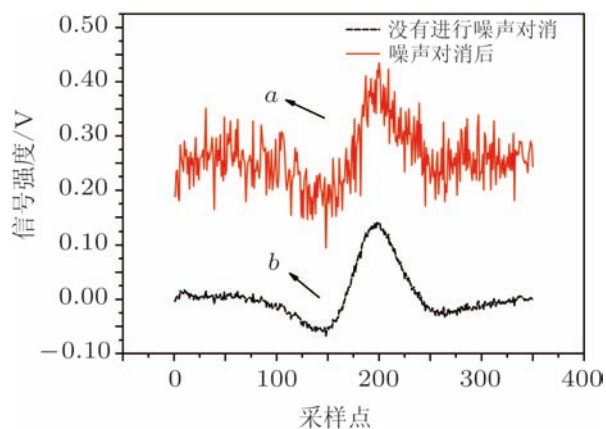


图3 噪声对消对 $2f$ 信号的处理结果

噪声时刻变化, 在遥测微量气体泄漏时, 这种变化的背景噪声恶化了谐波信号的提取, 所以在遥测中需要对这种背景噪声进行消除. 如图 3 曲线 *a*, 回波信号直接通过锁相放大器解调得到的  $2f$  信号, 其背景噪声信号十分明显, 而图 3 曲线 *b* 是通过噪声对消处理后, 再由锁相放大器解调后的  $2f$  信号. 可见, 激光器功率/电流调的非线性得到了很好地消除, 同时  $2f$  信号基线变得平坦, 能够提高系统的检测灵敏度.

#### 4 遥测光谱数据滤波处理

遥测回波信号中往往含有大量具有非平稳特性的背景噪声信息, 使得人们很难直接从观测信号中提取出反应真实物理量的有用信息. 例如, 在遥测天然气泄漏系统中, 遥测回波信号十分微弱, 而且遥测噪声具有非平稳噪声特性, 同时当周围的介质发生变化时回波信号是未知的时变信号. 经典 Fourier 变换去噪法对遥测回波信号滤波效果不理想, 因为 Fourier 变换只能刻画信号在整个时域上的频谱特征, 加窗 Fourier 变换也只能反映信号

在窗口内部分的特征. 而小波变换由于采用了自适应窗口, 时间窗口宽度与频率窗口的高度在各处是不同的, 是尺度参数的函数, 在分析检测高频信号时, 尺度参数减小, 时间窗口自动变窄, 频率窗口高度增加; 在分析检测低频信号时, 尺度参数增大, 时间窗口自动变宽, 频率窗口高度减小, 因而非常适于局部分析. 针对此种情况, 本文采用小波阈值去噪法对回波信号进行数字降噪处理.

小波阈值去噪法有硬阈值去噪和软阈值去噪, 其中软阈值方法通常会使得去噪后的信号平滑一些, 但是也会丢掉某些特征, 而硬阈值可以保留信号的特征, 但是在平滑方面有所欠缺<sup>[12]</sup>. 结合两种方法的特点, 本文提出了改进型软阈值去噪法, 在连续性更好的同时, 该方法的偏差要小于传统的软阈值方法, 其阈值函数表达式如下:

$$d_m(x) = \begin{cases} a^\lambda - 1 + x - \lambda & x \geq \lambda \\ a^x - 1 & 0 < x < \lambda \\ -a^{-\lambda} + 1 + x + \lambda & x \geq -\lambda \\ -a^{-x} + 1 & -\lambda < x < 0 \end{cases} \quad a \geq 1, \quad (10)$$

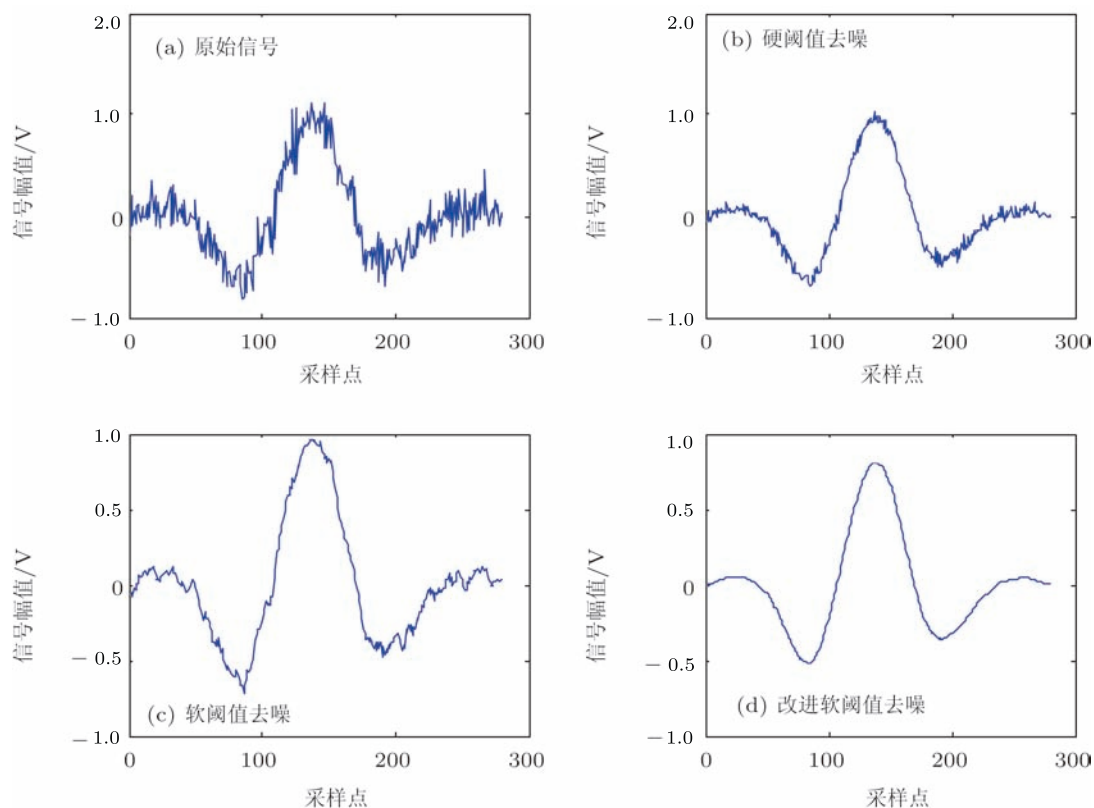


图 4 三种方法的去噪结果

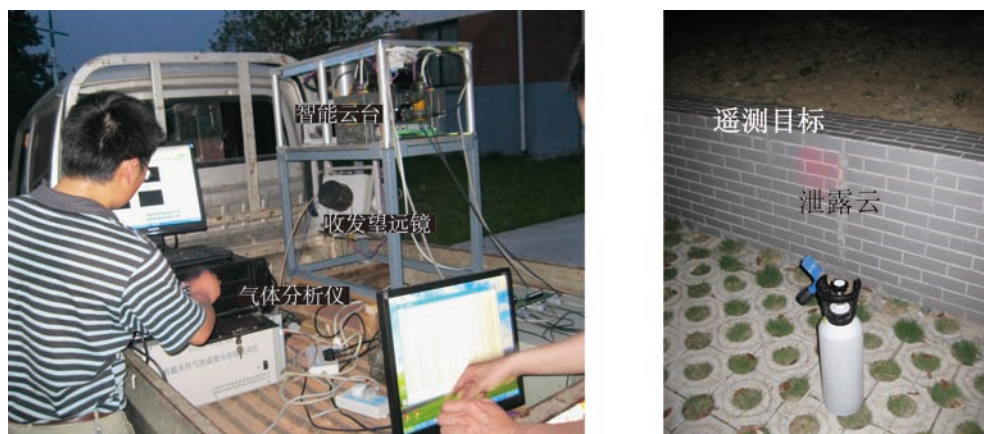


图5 外场实验实物图

其中,  $\lambda$  为阈值,  $x$  为小波系数,  $d_m(x)$  为处理后第  $m$  层的小波系数,  $a$  为阈值函数线型系数. 从 (10) 式可以得出当  $a = 1$  时, 该方法等同于传统的软阈值法, 而改进软阈值函数在噪声和信号之间存在一个平滑过渡的区域, 能实现更好的去噪效果. 为了论证其有效性, 对遥测的  $2f$  信号进行不同去噪并对结果进行分析.

如图 4 所示, 其中 (a) 为遥测回波信号经锁相解调后的  $2f$  信号, 计算此时的信噪比为 12.3 dB, (b) 为硬阈值去噪结果, (c) 为软阈值去噪结果, (d) 为改进软阈值去噪结果. 分别与标准  $2f$  信号进行相关性分析, 得到三种方法处理后的相关性分别为: 86.51%, 59.62%, 97.86%. 通过信噪比计算得到三种方法的信噪比分别为: 19.78 dB, 24.59 dB, 52.41 dB. 可见, 硬阈值法处理后的信号光滑度差, 但是信号形状保存尚好; 软阈值法处理后, 信号的光滑度效果不错, 但有较大的失真; 而改进软阈值法去噪结果更加平滑更好地抑制了噪声, 且相对软阈值去噪法, 信噪比提高了 2 倍多, 同时对有用信息的保留也比较好.

## 5 性能测试实验结果与分析

### 5.1 旋转扫描性能测试实验

考虑安全因素, 旋转扫描测试实验是在模拟情况下进行的, 测试地点选在合肥市的科学岛. 图 5 是外场设备, 天然气泄漏检测仪和智能移动云台放置在小卡车上, 主要包括天然气泄漏分析仪的控制部分、移动式云台的控制单元、遥测

收发望远镜、移动云台等; 遥测目标是路边距离卡车 30 m 远处的围墙, 在围墙上形成的光斑直径大约为 0.3 m, 模拟天然气泄漏条件有: 1) 采用 5% 的甲烷标气作为模拟泄漏云; 2) 气体流量控制在 20 kg/h; 3) 测试时东北风 1—2 级.

图 6 是一个动态角度旋转的测试结果. 移动云台的角度分别旋转:  $3^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $13^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $13^\circ$ , 进行遥测. 因遥测方向的变化导致光学路径上的气体浓度发生变化, 在移动云台方向变化时遥测结果呈现阶梯变化. 当激光正对泄漏云时, 光学路径上的甲烷气体积分浓度值最大可达到 1750 ppm/m. 随着角度旋转变化的, 激光束偏离了排气口, 外界空气的流动作用导致泄漏气体扩散, 光学路径上的气体积分浓度随着角度变大而降低, 当移动云台相对泄漏位置旋转至  $15^\circ$  时, 遥测光学路径积分浓度基本接近 1000 ppm/m. 同时, 当移动云台相对泄漏位置两次旋转至  $13^\circ$  时, 反演得到的光学路径气体积分浓

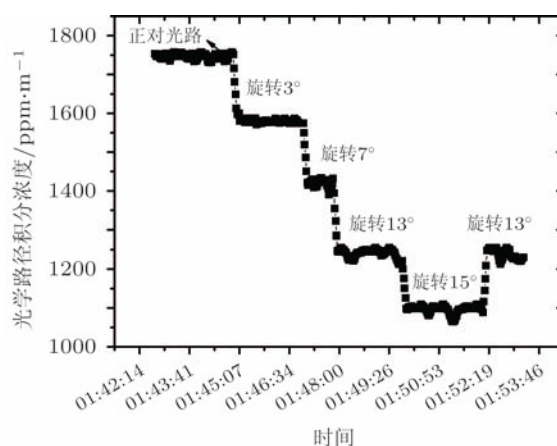


图6 旋转扫描实验结果

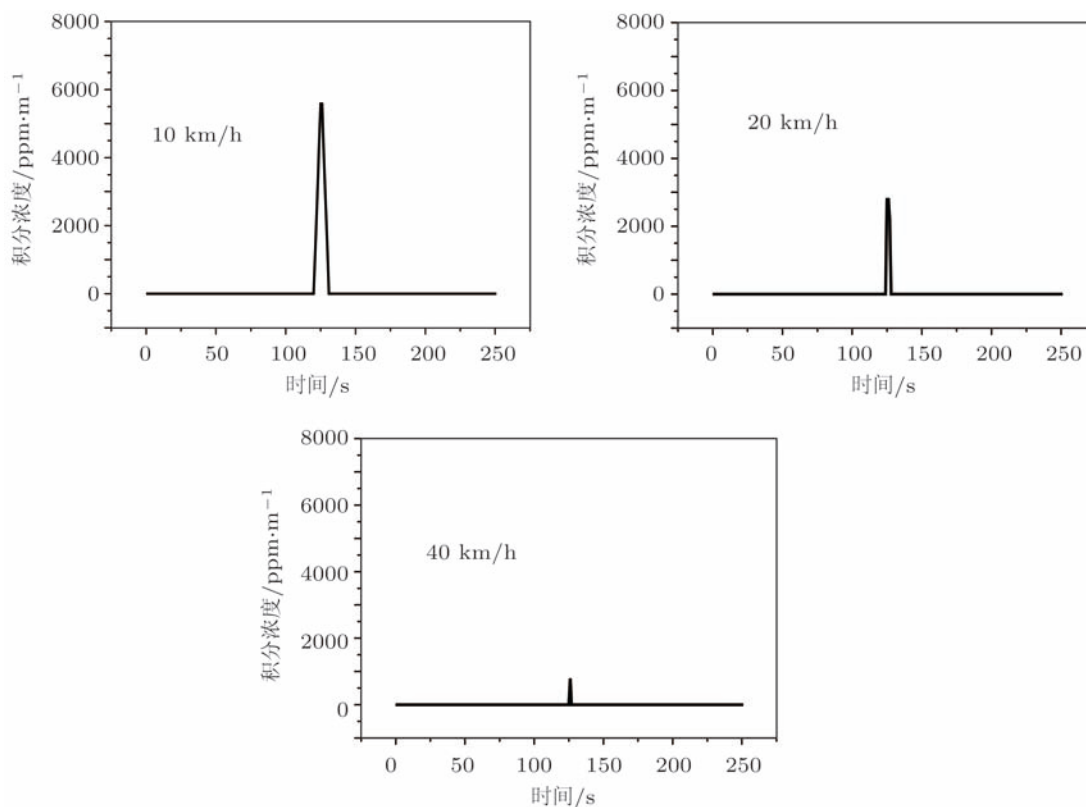


图7 不同速度下遥测固定气袋结果

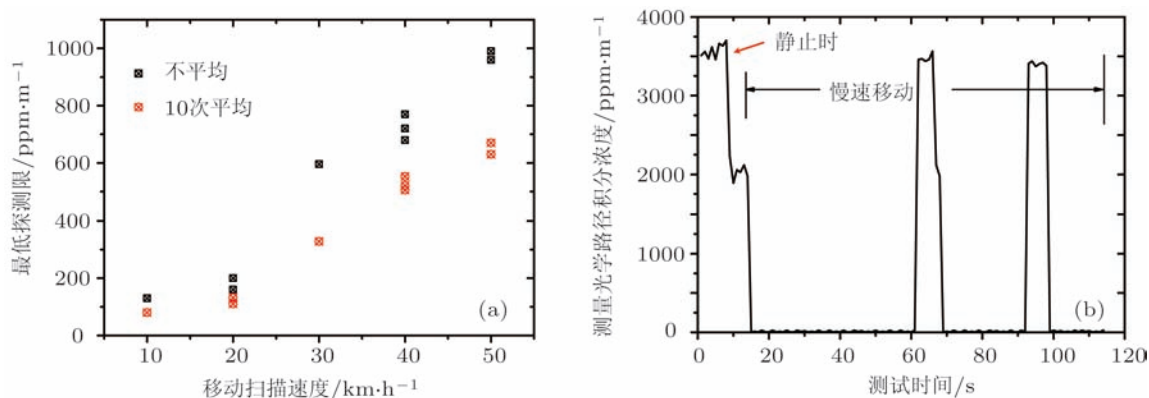


图8 (a) 速度与系统探测限的关系; (b) 一个稳定速度下的遥测结果

度值基本是一致的, 可见, 本系统具有旋转式定量遥测天然气泄漏功能.

### 5.2 移动扫描性能测试实验

移动扫描性能测试是在 30 m 遥测距离下得出, 遥测望远镜放置在小卡车上对准目标物以不同移动速度遥测, 主要目的是考察移动速度对遥测结果的影响. 首先往直径为 1 m 厚度为 0.4 m 的透明气袋内冲入 140156 ppm 固定浓度的甲烷气

体, 其积分浓度为 56062.4 ppm/m, 实验中小卡车分别以 10 km/h, 20 km/h, 40 km/h 的速度进行穿越. 如图 7 所示为 3 种不同速度穿越时的遥测结果, 可以看出, 随着目标相对速度的增加, 遥测气体积分浓度值减小. 在最低时速下, 最大期望积分浓度值可以被检测到, 但是只能得到 2 Hz 的数据点, 原因是当目标以 10 km/h 移动时, 直径 0.3 m 的光斑移动穿过直径 1 m 的气袋需要大于 0.57 s 的时间, 可以得到 3 到 4 个采样点, 此时空间分辨率为 0.25 m 左右, 因此均值以后的点的信号浓度大小

就是 5580 ppm/m.

当速度为 20 km/h 时,可以得到 1 到 2 个采样点,此时空间分辨率为 0.5 m 左右,但测量值中除了最大点读数还包含零点,除非累积时间正好等于或者小于激光在目标上停留的时间,否则就得不到正确结果.当目标以 40 km/h 的速度移动时,直径 1 m 的目标气袋从进入探测器探测区间到离开探测器探测区间的时间大约 0.14 s,而探测器响应时间为 0.139 s,造成任何一个在 0.14 s 样本遥测值存在“有甲烷”与“无甲烷”的对比点.总的测量值依赖于整个光束与目标重叠时间与系统响应时间的匹配程度.

如图 8(a) 所示,在 30 m 遥测距离下望远镜接收到的激光功率的最大值大约 8 nW,记录多组数据的最大信号电平,依据最佳噪声限值,计算探测限,在 10 次平均的情况下,探测限在低速条件下能达到 80 ppm/m.图 8(b) 表示以 15 km/h 的稳速移动穿过被测气体时遥测的结果,目标和激光光束之间的几何关系具移动遥测天然气管道泄漏的一般性,在卡车启动时由于抖动导致测量结果发生巨变,可见轻微的错位会对探测结果有较大的影响,一致性

在高速高空测量中更加难以实现.这种情况相比真实管道泄漏具有更大的挑战性,泄漏云很有可能充满了激光光束范围,在考虑光束在泄漏云的停留时间的匹配问题上,这个实验结果提供了参考价值.

## 6 结论

本文通过实验分析了基于激光吸收光谱技术移动定量遥测天然气泄漏中的关键技术问题.为实现高灵敏在线遥测,引入一个和 RAM 等值反相的信号,对偏差进行补偿,提高系统检测灵敏度.针对遥测回波吸收光谱信号特性,提出了改进型软阈值小波去噪法对  $2f$  信号进行数字滤波处理.最后,通过移动实验可以看出:激光束如何对准泄漏区域是一个关键问题,因为一个轻微的小角度的变化会直接影响检测结果;同时需要提高系统的响应时间来优化移动测量的稳定性,提高测量的空间分辨率.所以如何匹配移动速度、遥测距离及激光束发散角是移动遥测的关键性问题.这些结果为实现基于机载平台遥测天然气管道泄漏奠定了基础.

- [1] Wang D Q, Gao H L 2006 *Nat. Gas Ind.* **26** 120 (in Chinese) [王大庆, 高惠临 2006 天然气工业 **26** 120]
- [2] Fan H, Gao X M, Bao J, Wang X, Hang T 2006 *Spectrosc. Spect. Anal.* **26** 1423 (in Chinese) [樊宏, 高晓明, 鲍健, 王霞, 黄腾 2006 光谱学与光谱分析 **26** 1423]
- [3] Zhang S, Liu W Q, Zhang Y J 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 443
- [4] Jason J N, Joanna M D I, Murray J T 2002 *Appl. Opt.* **41** 446
- [5] Werle P, Mücke R, Amato F D 1998 *Appl. Phys. B* **67** 307
- [6] Amato F D, Mazzing H P, Castagnoli F 2002 *Appl. Phys. B* **75** 195
- [7] Qi F, Liu W Q, Zhou B 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2197 (in Chinese) [齐锋, 刘文清, 周斌 2003 物理学报 **52** 2197]
- [8] Normand E, McCulloch M, Duxbury G, Langford N 2003 *Opt. Lett.* **28** 16
- [9] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1927 (in Chinese) [阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧 2005 物理学报 **54** 1927]
- [10] Roths J, Zenker T, Parchatka U 1996 *Appl. Opt.* **35** 7075
- [11] Zhu X, Cassidy D T 1995 *Appl. Opt.* **34** 8303
- [12] Duan Y G, Ma L Y, Li Y J, Wang T H 2010 *Sci. Tech. Eng.* **23** 5755 (in Chinese) [段永刚, 马立元, 李永军, 王天辉 2010 科学技术与工程 **23** 5755]

# Research of quantitative remote sensing of natural gas pipeline leakage based on laser absorption spectroscopy\*

Zhang Shuai<sup>1)</sup> Liu Wen-Qing<sup>1)†</sup> Zhang Yu-Jun<sup>1)</sup> Ruan Jun<sup>1)</sup> Kan Rui-Feng<sup>1)</sup>  
You Kun<sup>1)</sup> Yu Dian-Qiang<sup>2)</sup> Dong Jin-Ting<sup>2)</sup> Han Xiao-Lei<sup>2)</sup>

1) (*Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*Shengli Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Dongying 257026, China*)

(Received 6 May 2011; revised manuscript received 15 June 2011)

## Abstract

Quantitative remote sensing of natural gas pipeline leakage based on laser absorption spectroscopy is reported. Key technical issues of mobile laser remote sensing are discussed through simulating leak detection. For quantitative remote sensing of trace leakage, the signals with counter-phase and isovalue of residual amplitude modulation are introduced. Then the offset is compensated, the influence of harmonic signal is reduced and sensitivity is improved. The improved soft-threshold denoising method is proposed by analyzing the characteristics of echo absorption spectrum. The results show that the signal-to-noise ratio is improved two times as great as that by the traditional soft-threshold denoising method and the shape of second harmonic ( $2f$ ) signal is well preserved. The minimum remote sensitivity will be 80 ppm/m under the mobile remote sensing.

**Keywords:** laser absorption spectroscopy, natural gas pipeline leakage, residual amplitude modulation, improved soft-threshold denoising method

**PACS:** 07.07.Df, 07.57.Ty

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development (863 Program) (Grant No. 2008AA06Z208).

† E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn