

一种移动式遥测天然气泄漏检测仪

张 帅¹, 刘文清^{1*}, 张玉钧¹, 阚瑞峰¹, 阮 俊¹, 王立明¹,
余殿强², 董金婷², 韩小磊², 崔益本¹, 刘建国¹

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, 安徽 合肥, 230031
2. 胜利工程设计咨询有限公司, 山东 东营 257026

摘 要 天然气管道泄漏检测对人员安全、环境保护以及国家财产安全等具有重要的意义, 但是, 由于管线跨越地域广阔, 操作工况以及环境情况复杂, 致使管线的泄漏检测存在困难。文章介绍了一种基于波长扫描差分吸收光谱技术的移动式遥测天然气泄漏检测仪。针对遥测回波吸收光谱特性, 提出了基于小波变换的改进型软阈值小波去噪方法, 实验分析能够提高系统信噪比 3 倍多, 同时在遥测光强为 530 nA 时, 可达到的最小遥测灵敏度为 80 ppm·m, 系统采用波长扫描差分吸收光谱技术成功实现天然气泄漏的定量遥测与准确定位, 具有快速、准确、智能及安全等特点。

关键词 无合作目标; 波长扫描差分吸收光谱; 定量遥测; 小波去噪

中图分类号: O443.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)02-0570-05

引 言

随着管道的增多, 管道运行时间的增长, 管壁受到冲刷腐蚀及人为破坏等原因, 管道泄漏事故频频发生, 给人民的生命财产安全造成了巨大的威胁。尤其管道泄漏后, 不仅造成经济上的损失, 而且会污染环境, 甚至引起火灾和爆炸。我国目前已建成管道 400 多条, 其中很多管线已经接近或者超过 20 年, 有的甚至处于超龄服役阶段, 因此管道天然气泄漏事故时有发生^[1-3]。如果能及时发现泄漏。准确定位泄漏源, 就能有效减轻泄漏事故造成的损失和危害。

目前管道泄漏检测技术主要包括电缆光纤泄漏检测法、声波检漏法、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等方法^[3]。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。目前国际上已经采用一种利用激光吸收光谱在线遥测天然气管道泄漏与定位^[4-6], 该方法具有快捷、准确、智能及安全等特点。本文在无合作目标背景下使用 1.65 μm 分布反馈式(DFB)激光器对甲烷气体进行远程遥测, 这种单模半导体激光器受到 10 kHz 的高频率锯齿波来回扫描单根甲烷的吸收线, 利用一个反相未吸收的参考信号进行噪声对消, 定量获得差分吸收光谱, 经过浓度反演

获得光学路径上甲烷气体的积分浓度, 实现移动遥测开放空间是否存在天然气泄漏, 从而定位泄漏源。

1 系统测量原理

差分吸收和谐波检测方法都是最常用的弱吸收检测方法。两种方法都可以通过半导体激光器实现, 因为一个半导体激光器频率可以很容易通过改变注入电流来控制。差分吸收能够实现 1×10^{-4} 的最小可检测的吸收, 而且易于实现, 对于 CH₄ 分子在 1.65 μm 处的吸收线强为 8.7×10^{22} , 线宽为 0.05 cm^{-1} , 理论计算差分吸收情况下检测下限为 7 ppm·m。

气体吸收遵循比尔定律, 当强度为 I_0 , 频率为 ν 的单体激光, 通过长度为 L 的吸收介质后, 在接收端测得的强度为 $I(\nu)$ ^[6-9]

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

其中, N 为分子数密度, $\sigma(\nu)$ 为气体分子的吸收截面。常压下气体分子的吸收线形可以用 Lorentz 线形描述, 分子吸收截面可以表示为

$$\sigma(\nu) = \frac{S}{\pi} \frac{\nu_L}{(\nu - \nu_0)^2 + \nu_L^2} \quad (2)$$

其中 S 为吸收线强, ν_L 为吸收线形半高半宽。吸收线中心的

收稿日期: 2011-03-27, 修订日期: 2011-06-08

基金项目: 国家(863 计划)项目(2008AA06Z208)和国家(973 计划)项目(2010CB234607)资助

作者简介: 张 帅, 1981 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: zhangshuai@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

吸收截面为

$$\sigma(\nu_0) = \frac{S}{\pi\nu L} \quad (3)$$

在弱吸收情况下($\sigma(\nu)NL \ll 0.05$), 激光对光强的吸收可以近似的表示为

$$\frac{\Delta I(\nu)}{I_0(\nu)} = \sigma(\nu)NL \quad (4)$$

式(4)即对不同频率光强的吸收比率。完整的一条光谱吸收通过对一条光谱进行频率积分, 表述如下

$$\text{absorb} = \int \sigma(\nu)NL \quad (5)$$

实际测量中得到的差分吸收光谱是时域下的, 需要通过标准具将采样点的时间转换到对应激光频域的波长, 从而得到吸收 absorb , 计算式(5), 在气体吸收光程 L 已知的情况下, 可以得到待测气体浓度。

系统结构图如图 1 所示, 主要包括激光器及激光器控制电路, 激光器利用 10 kHz 的高频锯齿波来改变注入电流实现波长扫描。激光束分成 3 束, 其中第一束经过波长定标池,

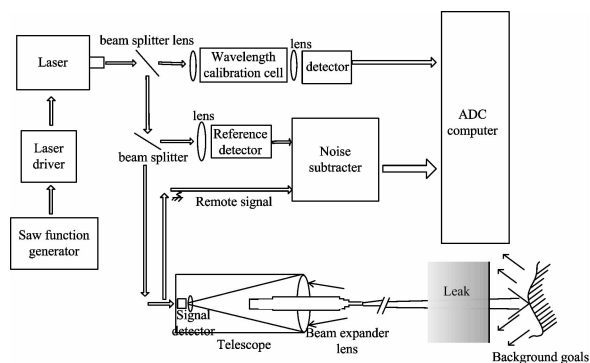


Fig. 1 System structure diagram of laser remote sensing of natural gas leaks

实现波长定标; 第二束激光不经过吸收直接由高灵敏 In-GaAs 探测器反相接收, 进入噪声对消电路, 作为参考信号; 第三束激光, 由铠装单模光纤传输到遥测收发望远镜, 遥测的回波信号经相同的光电探测器正相接收, 再进入噪声对消电路。噪声对消电路主要完成两路信号的自动增益放大与直流对消, 从而得到差分吸收光谱, 通过这种方法减弱了激光二极管固有噪声, 与电源纹波噪声的干扰。

2 信号去噪方法

遥测回波信号中往往含有大量的背景噪声信息, 这些叠加在有用信号中的噪声信息使得真实物理量的有用信息很难直接从观测信号中提取出来。为了提取感兴趣的有用数据, 必须对传感器采集的数据进行滤波处理滤除无用的噪声信号, 还原出被噪声污染之前的原始信号^[10]。在遥测天然气泄漏系统中, 遥测回波信号非常微弱, 通过弱信号处理电路处理后的差分吸收光谱信号经转换为数字信号, 这样的数字光谱信号仍然难以直接用于气体浓度的反演, 需要进一步的数字降噪处理。针对傅立叶变换的缺陷, 本工作提出了小波去噪分析方法在吸收光谱中的应用。

如图 2, 其中, (a) 为遥测回波信号经噪声对消后的差分吸收光谱信号, 计算此时的信噪比为 13.7 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。可以看出, 应用硬阈值去噪处理后的信号光滑度差, 但是信号形状保存还可以, 软阈值去噪, 光滑度不错, 但是信号有较大的失真, 而改进软阈值法的去噪结果更加平滑, 且对有用信号的形状保留也比较好。通过计算, 信噪比分别为: 17.39, 31.35 和 40.56 dB。可见, 改进软阈值法更好地抑制了噪声信号, 系统信噪比提高了 3 倍多, 同时处理后的差分吸收光谱线型接近甲烷气体在大气压下的吸收线型。

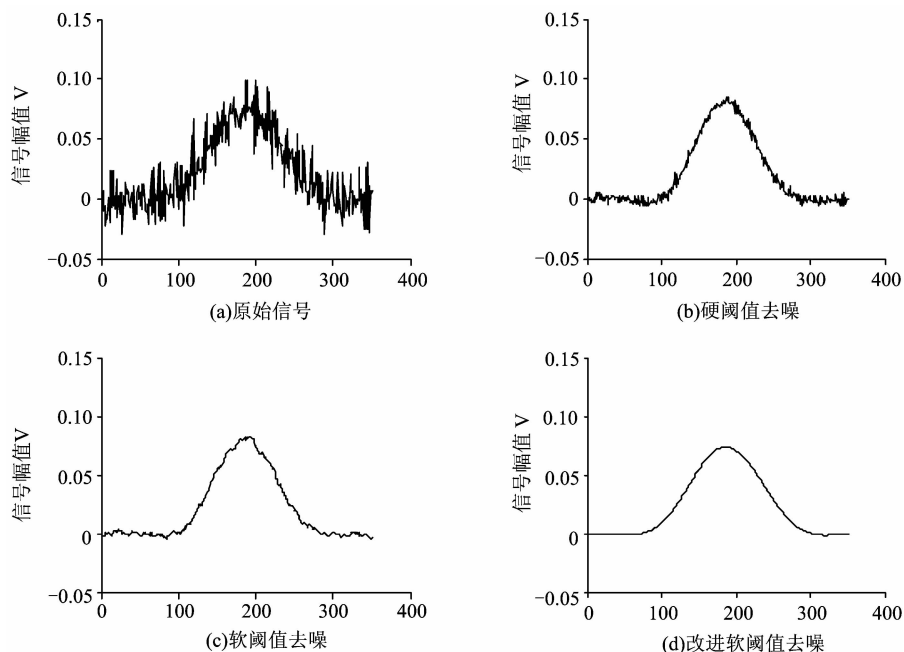


Fig. 2 Results of wavelet noise elimination

3 一元线性回归法消除奇异值

在遥测中,回波信号易受到外界干扰,强噪声叠加到吸收光谱中而导致假吸收现象,通过噪声对消电路处理得到的差分吸收光谱如图 2(a)所示,对于非气体吸收信号,采用式(6)中^[11]一元线性回归的相关系数进行筛选,实验研究发现遥测回波吸收光谱和内标池吸收光谱的相关性一般都要在 0.75 以上,在软件上对小于这个相关系数的吸收光谱个数进行多次累加判断,一般累加到 3 次可实现泄漏零误报效果,判别通过图 3 的流程在 VC++ 环境下得到实现。

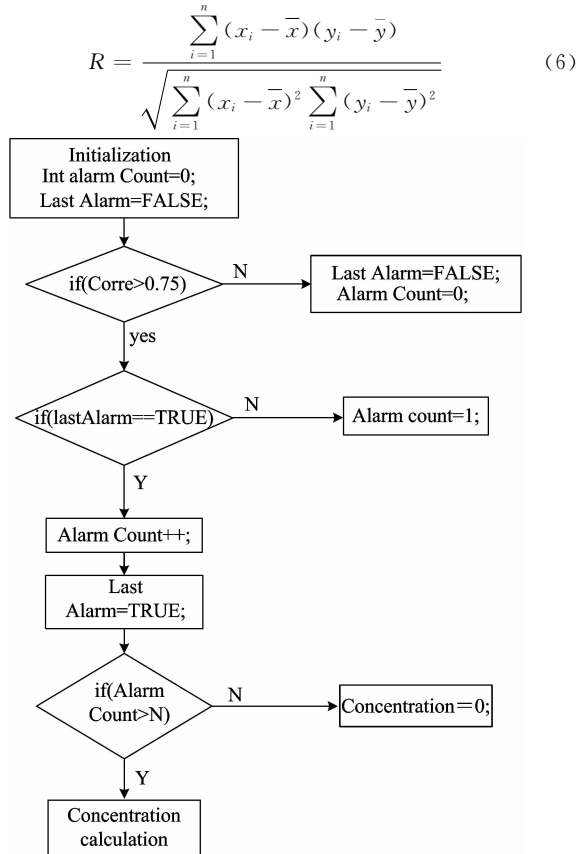


Fig. 3 Flow chart of eliminating fake leak

4 遥测光强和距离试验

在静态环境下,对遥测回波信号特性进行了研究。根据回波信号强度式(7),回波光强与距离的平方成反比,与目标的反射率以及有效光学接收面积成正比。如图 4 所示,系统的遥测回波信号强度随着距离的变化而先有增大的趋势后呈单调递减。分析原因,主要因系统所采用光学收发望远镜是同轴方式,由于接收望远镜的接收盲区发生变化,在距离发射端时,望远镜接收盲区变大,光学有效接收面积比较小,回来的激光基本被发射部分遮挡住了,探测器接收到的光子数比较少,导致系统信噪比差;当激光束的直径大于发射端的孔径时,望远镜的盲区渐渐减小,光斑的接收有效面

积渐渐变大,探测器接收到的光子数也增加,直到遥测距离达到 5 m 左右,出现回波光强的最大值;随着距离的变大,光学接收有效面积变大的速度小于距离平方的增加速度,所以接收到的光子数呈单调递减的趋势。

$$P_{LC} = \left(\frac{A_{col} R_{dif} \eta_{opt}}{R^2} \right) P_{out} \quad (7)$$

其中: A_{col} = 有效光学接收面积 (m^2), R_{dif} = 背景的反射率, η_{opt} = 光学效率, R = 激光发射和目标背景之间的距离 (m), P_{out} = 激光输出功率 (W)。

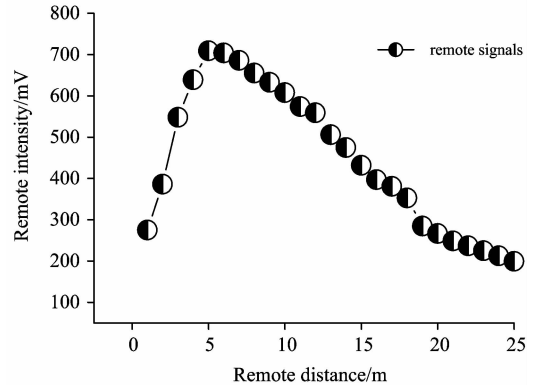


Fig. 4 The relationship between remote distance and remote intensity

表 1 给出了不同目标背景下的激光最大可遥测距离(最小信号可用于浓度测量),所采用的目标背景主要有:白色墙壁、砖块、树叶、草坪、白色衣物、干净的雪、书本、水泥路面、很脏的水面、金属表面、泥土面、以及很脏的雪。其中最大的遥测距离为 37 米,最小可遥测距离只有 3 m。

Table 1 The maximum remote distance of the different targets

Surface	Maximum range/m	Surface	Maximum range/m
White walls	31	Books	28
Brick	37	Cement road	29
Leaves	32	Dirty water	4
Lawn	29	Metal surface	33
White clothing	33	Soil surface	27
Clean snow	20	Dirty snow	16

激光后向散射对系统的遥测灵敏度有直接影响,本实验分析了不同后向散射光强下系统监测灵敏度 ($S : N = 1 : 1$)。在光学路径上放置一个长 5 cm 的标气池,里面冲入 5% 的甲烷标气,换成积分浓度为: $2\ 500\ \text{ppm} \cdot \text{m}$, 决定最小可探测限的关键因素是有多多少后向散射的光子能被探测器接收;实验以不同的发射功率激光束遥测同一目标反射物,测量光路路径中的气体,通过信噪比分析,获得不同接收光强下系统监测灵敏度,如图 5 所示,遥测光强为 530 nA 时,最小可探测灵敏度达到 $80\ \text{ppm} \cdot \text{m}$, 系统最小可探测浓度和接收的光强成反比,同时也可以看出系统存在一个固定的本底噪声。

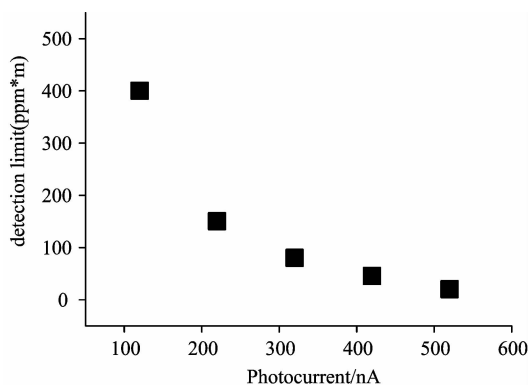


Fig. 5 Minimum detectable concentration at different light intensities

5 系统响应测试

利用高频锯齿信号扫描一条完整光谱吸收的方式实现泄漏检测,可以实现远距离检测泄漏量。如图 6 所示,在静态环境下,进行了系统响应的实验研究,我们扫描的频率为 10 kHz,得到一条吸收光谱需要的时间为 0.000 1 s,为了提高信噪比,在采集吸收光谱后进行了累加平均,根据 Allan 方差得到的最佳平均次数大约为 128 次,再经过小波去噪的数字信号处理后回归拟合反演甲烷气体浓度,利用式(6)实现一元线性回归消除奇泄漏异值,实验中选择 $N=3$ 时基本实现误判率为 0 的判别效果,所有过程经过估算不超过 0.08 s,而实际测量得到系统的响应时间为 0.139 s。可以看出,检测到泄漏时直接出现一个比较大的泄漏值,原因在于软件上对泄漏进行累加判别,直到泄漏次数达到累加次数 $N=3$ 时,才认为是天然气泄漏,因此开始舍去前 3 次的泄漏值,才出现泄漏,同时,由于在测试系统响应时,气体泄漏排放的时间比较短,气体在光学路径上的扩散很快,遥测浓度值慢慢下降,很快降至零。

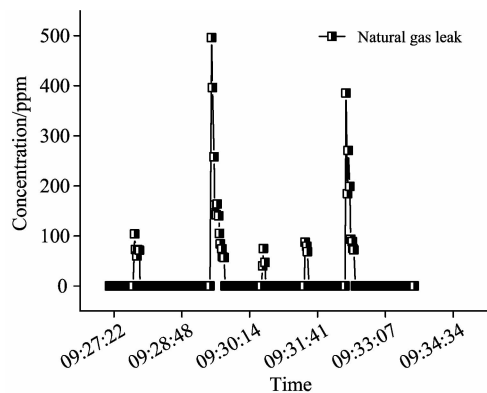


Fig. 6 The experiment of the systematic response

6 模拟泄漏实验

最后模拟了天然气泄漏实验,模拟的实验条件是:(1)采用 5% 的甲烷表气作为泄漏气体;(2)遥测距离为 30 m,遥测反射背景为白色的墙壁。气体流量控制在 $20 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,因在外场实验,当时东北风 1~2 级,如图 7 所示,首先在激光光束路径上进行模拟泄漏实验,实验中选择在激光发射端、白色墙壁上和光束中间的位置处进行泄漏实验,在三个不同的位置处获得的泄漏检测结果基本差不多,因遥测得到的浓度是光学路径的积分浓度,符合气体吸收光谱理论。同时也在光束垂直面上不同位置处模拟天然气泄漏,垂直距离分别在 0.5 m 处和 1 m 处,利用气体扩散到光学路径上进行遥测定量分析,当在不同位置处泄漏时,气体扩散到激光光束上的含量多少,可以实时遥测,结果可以看出随着泄漏源垂直距离的变大遥测结果变小,其原因是垂直距离较远时气体扩散到光学路径上的气体含量比较少。

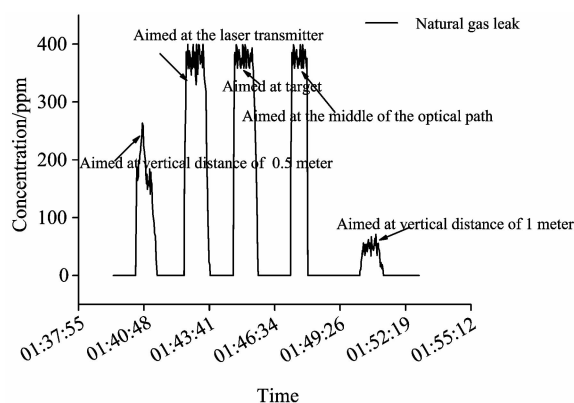


Fig. 7 Simulated gas leak in the non-cooperative target experiment

7 小结

利用波长扫描差分吸收光谱技术实现了在无合作目标背景下天然气泄漏的定量遥测。针对回波光谱特征,提出了基于小波变换的数字信号处理技术在吸收光谱信号中的应用,提高了 3 倍多的系统信噪比。同时,研究了无合作目标下的回波信号特性,在回波光强为 530 nA 时,遥测最小监测灵敏度可以达到 $80 \text{ ppm} \cdot \text{m}$,在系统的响应实验中,实际测得系统的响应仅有 0.139 s,模拟泄漏实验表明,利用激光波长扫描差分吸收光谱技术可以实现快捷、准确、智能及安全地天然气泄漏在线遥测,为管道天然气管道泄漏检测提供一种新的光谱诊断方法。

References

- [1] WANG Zhi-qiang, WANG Zhao, ZHUANG Tao(王志强, 王 钊, 庄 涛). Modern Enterprise Culture(现代企业文化), 2009, 11: 159.
- [2] LIAO Ke-bing, ZHOU Rong-yi, LIU Ai-qun(廖可兵, 周荣义, 刘爱群). Industrial Safety and Environmental Protection(工业安全与环保), 2007, 33(2): 27.
- [3] FU Dao-ming, SUN Jun, HE Zhi-gang, et al(付道明, 孙 军, 贺志刚, 等). China Petroleum Machinery(石油机械), 2004, 32(3): 48.
- [4] Michael B Frish, Michael A White, Mark G. SPIE, 2000, 4199: 5.
- [5] Ben V W, StuartMurray Jane H, Russ P, et al. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. , 2005, 7: S420.
- [6] Zhang S, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Chin. Opt. Lett. , 2010, 8(5): 443.
- [7] Werle P, Mücke R, Amato F D, et al. Appl. Phys. B, 1998, 67(3): 307.
- [8] ZHANG Shuai, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, et al(张 帅, 刘文清, 张玉钧). Acta Optica Sinica(光学学报), 2010, 30(5): 1362.
- [9] Wang J, Maiorov M, Douglas S B, et al. Appl. Opt. , 2000, 39(30): 5579.
- [10] HUANG Yi-jun, WANG Jin-you(黄宜军, 汪金友). Acta Metrologica Sinica(计量学报), 2007, 28(2): 163.
- [11] SUN Hua(孙 华). Journal of Changsha Medical College(长沙医学院学报), 2008, 12(25): 46.

A Mobile Sensor for Remote Detection of Natural Gas Leakage

ZHANG Shuai¹, LIU Wen-qing^{1*}, ZHANG Yu-jun¹, KAN Rui-feng¹, RUAN Jun¹, WANG Li-ming¹, YU Dian-qiang², DONG Jin-ting², HAN Xiao-lei², CUI Yi-ben¹, LIU Jian-guo¹

1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. Shengli Engineering Design & Consulting Co. , Ltd. , Dongying 257026, China

Abstract The detection of natural gas pipeline leak becomes a significant issue for body security, environmental protection and security of state property. However, the leak detection is difficult, because of the pipeline's covering many areas, operating conditions and complicated environment. A mobile sensor for remote detection of natural gas leakage based on scanning wavelength differential absorption spectroscopy (SWDAS) is introduced. The improved soft threshold wavelet denoising was proposed by analyzing the characteristics of reflection spectrum. And the results showed that the signal to noise ratio (SNR) was increased three times. When light intensity is 530 nA, the minimum remote sensitivity will be 80 ppm * m. A widely used SWDAS can make quantitative remote sensing of natural gas leak and locate the leak source precisely in a faster, safer and more intelligent way.

Keywords Non-cooperative target; Scanning wavelength differential absorption spectroscopy (SWDAS); Quantitative remote sensing; Wavelet denoising

(Received Mar. 27, 2011; accepted Jun. 8, 2011)

* Corresponding author