

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2013.02.017

激光吸收光谱自适应滤波处理算法研究

赵海培^{1,2}

(1 中国石油大学 (华东), 山东 东营 257061 ;

2 胜利油田胜利勘察设计研究院有限公司, 山东 东营 257026)

摘 要: 研究了激光吸收光谱自适应滤波处理算法, 提出了一种改进的激光吸收光谱测量系统方案, 激光器发射的激光经分束器分成三路, 分别构成测量通道、定标通道和参考通道, 数据采集电路同步获取三个通道信号数据, 定标通道数据用于波长锁定和浓度定标, 参考通道信号数据包含了与测量通道相关的噪声, 以此为基础构建了自适应噪声抵消器, 降低了噪声对测量通道的影响, 提高了气体浓度反演的精度。

关键词: 光谱学; 可调谐半导体吸收光谱学; 自适应滤波; 气体探测

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2013)02-0231-05

Investigation of adaptive filtering algorithm for laser absorption spectroscopy

ZHAO Hai-pei^{1,2}

(1 China University of Petroleum, Dongying 257061, China ;

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

Abstract: An adaptive filtering algorithm for laser absorption spectroscopy was investigated. An improved measuring system scheme of laser absorption spectroscopy was proposed. Light beam emitted from laser was divided into three beams which constructed measurement channel, calibration channel and reference channel, respectively. Data acquisition circuit acquired signal data from three channels. Data from calibration channel was used for wavelength locking and concentration calibration. Signal data from reference channel contained noise associated with the measurement channel. Based on this, an adaptive noise canceller was constructed to reduce the effects of noise on measurement channel and improve the accuracy of the gas concentration inversion.

Key words: spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; adaptive filter; gas sensing

1 引 言

可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 气体检测具有灵敏度高、选择性强和响应快速的特点, 在大气痕量气体探测、工业过程气体检测、有毒有害气体探测等方面具有广泛的应用前景^[1~4]。

直接吸收光谱技术是 TDLAS 中运用最广泛的检测技术之一, 它直接测量不同气体吸收线的特征吸收光谱, 根据气体分子的吸收截面, 基于 Beer-Lambert 定律计算出被测气体的浓度, 是一种不需定标的直接

基金项目: 中石化重大装备国产化项目 (W09019) 资助

作者简介: 赵海培 (1971 -), 山东淄博人, 博士生, 高级工程师, 主要从事油田地面工程自动化技术的研究。 **E-mail:**

收稿日期: 2012-11-26; **修改日期:** 2013-01-26

测量技术。然而与由电流调制导致的斜坡背景信号相比,直接吸收信号幅度较小,并且受到激光光源、光电探测、信号放大与采集等噪声的影响,因此,直接利用吸收光谱信号进行浓度反演时存在较大的随机误差,严重影响气体浓度计算的精度。

本文提出了基于自适应滤波处理技术的激光吸收光谱数据处理算法,为了获得与被测光谱相关的噪声,在测量系统中增加一路参考通道,数据采集电路同步获取参考通道和测量通道的信号,参考通道信号包含了与测量通道相关的噪声,以此为基础构建了自适应噪声抵消器,提高了气体浓度反演的精度,为复杂噪声环境下的高精度气体检测提供了参考。

2 测量原理

激光气体传感器是一种以激光作为光源的高分辨吸收光谱气体检测装置,遵循 Beer-Lambert 吸收定律,激光通过被测气体吸收后的透过率为

$$T = I_m(\lambda)/I_0(\lambda) = \exp[-C\sigma(\lambda)L], \quad (1)$$

其中, $I_m(\lambda)$ 是通过被测气体吸收长度为 L 的光谱信号, $I_0(\lambda)$ 是初始光强, C 是吸收分子数浓度, $\sigma(\lambda)$ 是待测气体的特征吸收截面。因此被测气体的浓度为

$$C = \frac{\ln I_0(\lambda)/I_m(\lambda)}{\sigma(\lambda)L}, \quad (2)$$

从 (2) 式可以看出,待测气体浓度取决于待测气体的特征吸收截面 $\sigma(\lambda)$ 、吸收光程 L 、气体吸收信号 $I_m(\lambda)$

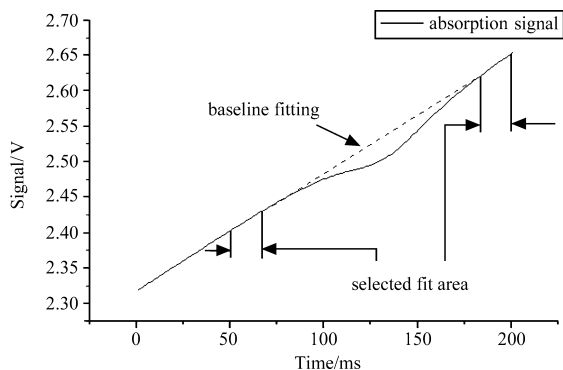


Fig.1 The absorption signal scanned and the baseline fitting

和初始光强信号 $I_0(\lambda)$ 。

直接吸收法的分析过程为:通过锯齿扫描信号改变激光器的注入电流来对激光器的波长进行调谐,激光的输出被分束片分成两束,其中一束直接通过测量的气体介质,被探测器检测,由于气体的吸收,它的强度图如图 1 所示。

通过对谱线上没有气体吸收的区域进行低阶的多项式拟合,可以得到近似的初始激光强度,由这两个强度能够得到随时间变化的吸光度,但从公式 (2) 可知,要反演气体的浓度,需要将吸光度转换到频域,因此将另外一束激光通过标准具,其强度被测量,标准具谱线峰-峰值之间的距离在光学频域是一个常量,也就是标准具的自由谱线范围 (FSR),因此,标准具的谱线反映了激光的频率与时间的关系,利用这种关系可以将吸光度转换到频域,得到频域上的吸收谱线,然后用理论上的跃迁线型去拟合这条谱线,就能够得到气体的浓度。

3 算法及误差分析

由式 (2) 可知,测量得到吸收后的光谱数据、原始光谱数据以及待测气体的特征吸收光谱可以计算得出待测气体浓度。然而,实际测量时,由于激光强度、光电探测、信号放大器和采集电路等噪声的存在,使得测量得到的光谱数据受噪声的干扰,影响了待测气体浓度的反演精度。用 $I_{m,d}(n)$ 表示采集的激光通过被测气体吸收后的激光光谱信号, $v_{m,d}(n)$ 表示 $I_{m,d}(n)$ 中的各种噪声,一般地说, $v_{m,d}(n)$ 均值为 0, 方差为 $\sigma_{m,d}(n)$, n 为采集的通道数。因此,数据采集实际获得的测量通道数据可以表示为

$$I_{m,d}(n) = I_0(n) \exp[-\sigma(n)CL] + v_{m,d}(n). \tag{3}$$

利用公式 (2) 计算, 得

$$\begin{aligned} \frac{\ln I_0(n)/I_{m,d}(n)}{\sigma(n)L} &= \frac{\ln I_0(n)/[I_0(n) \exp[-C\sigma(n)L] + v_{m,d}(n)]}{\sigma(n)L} = \\ &= \frac{\ln[I_0(n) \exp[-C\sigma(n)L] + v_{m,d}(n)]/I_0(n)}{\sigma(n)L} = \\ &= \frac{\ln[\exp[-C\sigma(n)L] + v_{m,d}(n)/I_0(n)]}{\sigma(n)L} \approx \\ &= C + v'_{m,d}(n), \end{aligned} \tag{4}$$

式中 $v'_{m,d}(n) = -v_{m,d}(n) \frac{1 + C\sigma(n)L}{I_0(n)\sigma(n)L}$ 。

从式 (4) 可以看出, 由于受到各种噪声的影响, 利用获取的实际吸收光谱信号计算得到的数据是气体浓度和噪声 $v'_{m,d}(n)$ 的叠加。如果不采取数据处理措施, 计算得出的数据将随噪声变化。

4 改进的测量装置及自适应滤波算法

4.1 改进的测量装置

激光气体测量装置^[5~7]组成原理如图 2 所示。系统采用分布反馈式激光器作为光源, 选择气体单根特征吸收谱线进行测量, 通过激光器温度控制电路调谐激光输出波长在特征吸收波长中心处, 电流控制电路产生激光器中心工作电流和波长扫描电流, 控制输出激光波长扫描通过气体特征吸收波段, 激光器输出的激光通过 1:1:8 分束器后, 分别进入参考通道、定标通道和测量通道。参考通道由激光准直发射和光电接收探测器 1 构成, 用于测量激光发射的扫描信号, 与式 (1) 中 $I_0(\lambda)$ 成正比; 定标通道由激光准直发射、光电接收探测器 2 和一个 20 cm 密封有标准浓度气体的吸收池构成, 其信号作为气体浓度反演时的定量标准; 测量通道由激光准直反射、光电接收探测器 3 和 Herriot 多次反射吸收池构成, 待测气体经过气路进入多次发射吸收池中, 激光扫描信号经过待测气体和多次反射吸收池后入射到光电探测器 3, 增加了气体吸收光程, 光电接收探测器 3 输出的信号即为式 (1) 中的 $I_m(\lambda)$ 。信号采集电路同时采集 3 个光电探测器的信号。

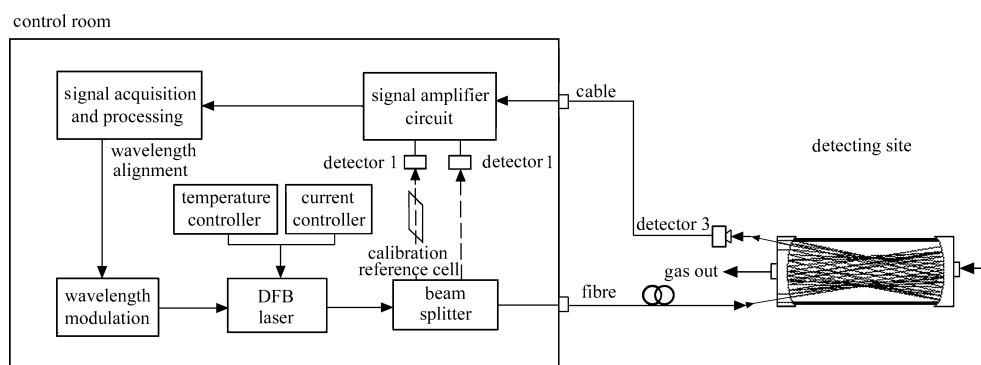


Fig.2 Schematic of monitoring system based on the laser absorption spectroscopy

测量通道的信号数据 $I_{m,d}(n)$ 如式 (3) 所示, 参考通道的信号数据 $I_{r,d}(n)$ 为

$$I_{r,d}(n) = kI_0(n) + v_{r,d}(n), \tag{5}$$

定标通道的信号数据为

$$I_{c,d}(n) = I_0(n) \exp[-\sigma(n)C_cL] + v_{c,d}(n), \quad (6)$$

其中, $v_{m,d}(n)$ 、 $v_{r,d}(n)$ 和 $v_{c,d}(n)$ 分别为测量通道、参考通道和定标通道的加性噪声, 由于噪声主要来源于激光器、信号采集电路、电源电路, 因此, 噪声 $v_{m,d}(n)$ 、 $v_{r,d}(n)$ 和 $v_{c,d}(n)$ 是相关的, 因此可以采用自适应滤波技术。

4.2 自适应滤波算法

自适应滤波器是以最小均方方差为准则的最佳滤波器, 设计自适应滤波器时不必预先知道信号与噪声的自相关函数, 而且在滤波过程中信号与噪声的自相关函数即使随时间作慢变化也能自动适应, 自动调节到满足最小均方误差的要求。可以利用自适应滤波器的概念构建自适应噪声抵消器^[8], 如图 3 所示。图中: 受干扰的原始输入 $s+n_0$ 为 $I_{m,d}(n)$; 参考输入 n_1 为与干扰信号 $v_{m,d}(n)$ 相关、而与信号 $I_0(n) \exp[-\sigma(n)CL]$ 不相关的干扰 $v_{r,d}(n)$; $y_j(n) = w_j v_{r,d}(n)$; $e_j(n) = I_{m,d}(n) - y(n) = I_{m,d}(n) - w_j v_{r,d}(n)$; 自适应滤波器 AF 根据误差 e_j 的控制调整 w_j , 使得它的输出 y_j 趋于 $I_{m,d}(n)$ 中与 $v_{r,d}(n)$ 相关的 $v_{m,d}(n)$, 于是 e_j 作为 $I_{m,d}(n)$ 与 y_j 之差就接近等于信号 $s(n) = I_0(n) \exp[-\sigma(n)CL]$ 。利用公式 (2) 计算得到气体浓度 C 。

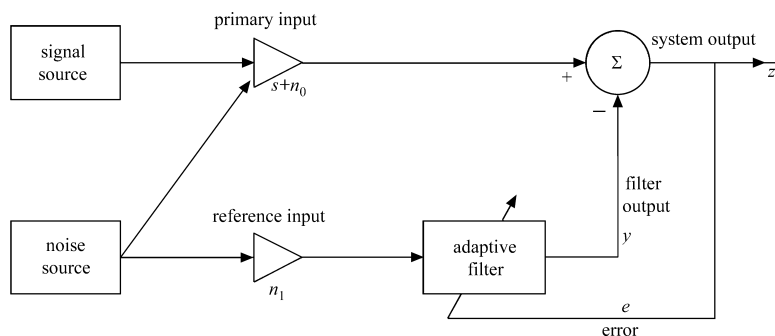


Fig.3 Schematic of adaptive noise canceller for laser absorption spectroscopy

5 数据分析

图 4 所示的是应用上述系统和算法获得的处理前后的波形图, 从图中可以看出, 采用自适应噪声抵消算法后, 波形数据的均方差明显降低, 信噪比大约提高 10 倍。

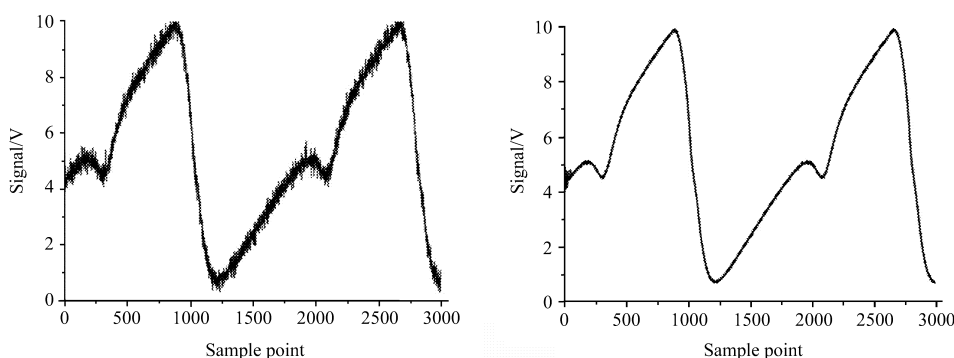


Fig.4 The waveform of laser absorption spectroscopy

应用此套传感器系统对中石化中原油田普光分公司天然气气田的多个天然气输送隧道进行实时监测, 其中对一条长 846.46 m 的输送管道进行了连续监测, 其一周 CH_4 和 H_2S 监测数据如图 5 所示, 能发现监测结果有明显的日变化, 连续一周 CH_4 的观测均值为 1.07 ppm, H_2S 的观测均值为 0.193 ppm。且监测结果表明天然气输送管道无天然气泄漏发生。天然气生产及集输过程运行安全可靠^[9]。

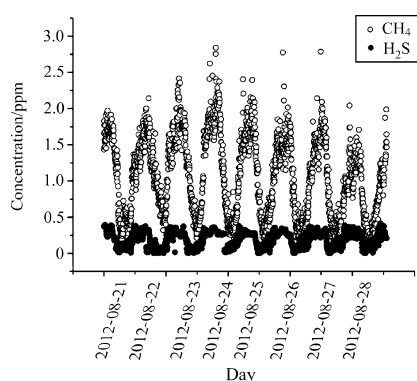


Fig.5 The measurement of CH₄ and H₂S for transmission tunnel

6 结 论

本文提出了一种采用自适应滤波技术实现激光吸收光谱数据的噪声抵消处理算法,该方法基于直接吸收光谱技术,在系统中增加参考测量通道,其信号不仅与原始光强成比例,而且包含了与测量通道相关的噪声,以此为基础构建了自适应噪声抵消器,提高了气体浓度反演的精度,为复杂噪声环境下的高精度气体检测提供了参考。

参考文献:

- [1] Werle P. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta*, 1998, 54(2): 197-236.
- [2] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B*, 1981, 26(3): 203-210.
- [3] Durry G, Pouchet I, Amarouche N, et al. Shot-noise-limited dual-beam detector for atmospheric trace-gas monitoring with near-infrared diode lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(30): 5609-5619.
- [4] Frish M B, Sonnenfroh D M. Trace gas analyzers based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) for energy production, transmission, and storage [C]. *OSA/Energy*, 2009.
- [5] Brown L R, Naumenko O V, Polovtseva E R, et al. Hydrogen sulfide absorption spectrum in the 5700~6600 cm⁻¹ spectral region [C]. *Proc. SPIE*, 2004, 5311: 59-67.
- [6] Wang M, Zhang Y J, Liu J G, et al. Applications of a tunable diode laser absorption spectrometer in monitoring greenhouse gases [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, 4(6): 363-365.
- [7] Shu X W, Zhang Y J, Zhang S, et al. The measurement of the H₂S in the pre-desulfurization of natural gas in the Shengli oil field with the TDL [C]. *Proc. SPIE*, 2009, 7382: 738220-1-738220-9.
- [8] McCool J M, Widrow B. Principles and applications of adaptive filters: a tutorial review [R]. *IEEE ISCAS*, 1980: 1143-1157.
- [9] Wang L M, Zhang Y J, Li H B, et al. Study on long distance transmission technique of weak photocurrent signal in laser gas sensor [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, 10(4): 042802-1-042802-4.