

光纤气体传感的双光路相位保持方法

李政颖 王洪海 程松林 赵磊 余鑫

(武汉理工大学光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要 在波长调制法的光谱吸收型气体传感器设计中,通常采用二次谐波检测技术。然而含有气体体积分数信息的被测信号和二倍频参考信号的相位差变化严重影响了二次谐波信号测量结果。采用双光路相位保持设计来解决这一问题,设计包括移相电路和双光路两部分,移相电路由数字电路组成,调整方便,用来消除电路本身固有延时;光路部分通过增加一路不经气室吸收的参考光路,同检测光路组成双光路,保证无论光纤长度如何变化,被测信号和参考信号相位始终相同。在波长调制的基础上引入双光路相位保持设计后,随被测信号相位 $0\sim 90^\circ$ 变化,测量结果误差值低于 $\pm 10\%$ 。这种设计提高了系统检测结果的稳定性,实现了恶劣环境中,任意距离任何位置的气体体积分数检测。

关键词 光谱学; 相位保持; 双光路; 波长调制

中图分类号 O433.5⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0728

Phase-Synchronization Using Double Optical-Path Technology in Fiber Optic Gas Sensors

Li Zhengying Wang Honghai Chen Songlin Zhao Lei Yu Xin

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education,
Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract The second harmonic is used when using wavelength modulation technology to design gas sensor based on optical spectrum. Whereas phase difference between gas sensing signal and double frequency reference signal has great influence on the measured result of second harmonic. A reference optic fiber is used to synchronize the phases. There are two parts in this technology: phase shift circuit and reference optic fiber. Phase shift circuit consists of digital circuit which is used to compensate circuit delay and is easy to modulate. Reference optic fiber which does not pass by gas cell is added in the optical path. It makes sure that the phases between measured signals and referenced signals are synchronized no matter how the length of the optic fibers changes. In the design of phase synchronization using double optical path based on wavelength modulation, the error of measured result keeps lower than $\pm 10\%$ with phase of measured signals changing from 0° to 90° . It not only simplifies the calibration of the sensor, but also makes possible to install the sensor at any distance site.

Key words spectroscopy; phase synchronization; double optical path; wavelength modulation

1 引 言

随着工业不断发展,社会不断进步,用于安全预防和污染控制目的的气体监测越来越受重视^[1]。可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)^[2~4]是一种具有高灵敏度、高分辨率、快速检测特点的气体检测技术。利用半导体激光器可调谐和窄线宽的特性,通过检测气体的一条振转吸收线来实现气体体积分数的快速

检测,避免了其它气体的干扰。与传统的测量方法,如与非分散红外吸收和气相色谱法等相比,以可调谐半导体激光器为光源的可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)测量方法干涉小、成本低、器件性能稳定,可通过光纤远距离传输,避免了工业恶劣环境的干扰,在气体体积分数测量方面具有广泛的应用前景。

TDLAS 技术测量气体的体积分数通常使用波

长调制方法^[5,6],波长调制是将叠加了高频正弦信号的矩形波加到激光电流上,探测器输出的信号进入锁相放大器,被正弦信号的倍频信号解调就得到与被测气体体积分数相关的谐波信号。波长调制法可以有效地抑制高频背景噪声,使探测极限可以达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 的吸收单位。

虽然这种方法的检测灵敏度比直接吸收方法要高2~3个量级,但是进入锁相放大器的被测信号和参考信号的相位差会对结果产生极大的影响。本文通过双光路相位保持设计来消除相位差,从而消除因相位差产生的测量误差。

2 波长调制原理

光通过介质时部分被吸收,由于气体分子的吸收对光谱具有选择性,而且与吸收系数、物质的体积分数、通过吸收介质的长度有关。根据比尔-朗伯特(Beer-Lambert)定律,出射光强 I 与入射光强 I_0 和气体的体积分数之间的关系为

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL], \quad (1)$$

式中 $\alpha(\nu)$ 为气体吸收系数,即气体在一定频率 ν 处的吸收线型; L 为吸收路径的长度; C 为气体的体积分数; I 和 I_0 的单位是坎德拉。

当激光发射波长在中心波长 ν_0 处,以 ω 对激光的频率进行调制,激光的瞬时频率为

$$\nu = \nu_0 + \nu_m \cos \omega t, \quad (2)$$

ν_m 为调制振幅,通过吸收带后的激光强度可以表达成余弦傅里叶级数:

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

式中的 A_n (对 $n > 0$)是不同谐波成份,可以通过锁相放大器来进行测量:

$$A_n(\nu) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu + \nu_m \cos \theta) \times \exp[-\alpha(\nu + \nu_m \cos \theta)CL] \cos(n\theta) d\theta, \quad (4)$$

这里 $\theta = \omega t$ 。对于近红外分子吸收来说,一般都满足 $\alpha CL \ll 1$,因此

$$\exp[-\alpha(\nu + \nu_m \cos \theta)CL] \approx 1 - \alpha(\nu + \nu_m \cos \theta)CL, \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,并把 $\alpha(\nu)$ 进行 Taylor 展开后,(4)式可以写成

$$A_n(\nu) = -\frac{I_0 S C L 2^{1-n}}{n!} \nu_m^n \left. \frac{d^n \alpha(\nu)}{d\nu^n} \right|_{\nu=\nu_0}, \quad (6)$$

从(6)式可见,二次谐波信号与气体的体积分数,气室长度和初始光强有关,检测二次谐波信号就

可以获得气体体积分数信息^[7~9]。在实际测量之前,仪表需先标定。用仪表检测几种标准样气,得到相应的标定值,进行曲线拟合后得到气体体积分数和标定值之间的线性关系式,再根据关系式进行实际测量。由于在实际测量时,初始光强可能会发生变化,因此将二次谐波信号和光强的比值作为气体体积分数标定值,这样可以消除光源波动、光纤接入、光纤传输等各种光强变化产生的影响^[10]。由于地噪声和光噪声的干扰,测量值会产生一定误差,工业要求测量值和实际气体体积分数值之间误差在 $\pm 10\%$ 以内。

3 系统设计

3.1 仪表设计

本文设计的气体体积分数检测仪分两部分:包含有光源、光电二极管和信号处理电路的仪表部分和传感探头部分。其结构见图1。

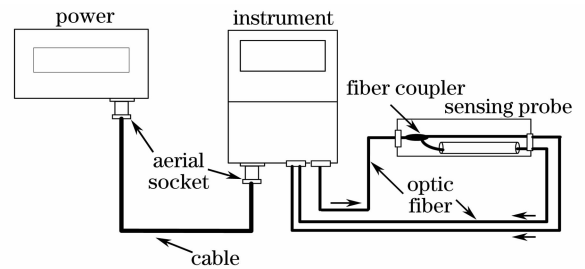


图1 气体检测仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas monitor

气体体积分数检测仪采用分离式设计,传感探头和仪表没有连成一体,它们之间通过光纤连接,含有体积分数信息的光信号通过光纤传输到仪表进行处理。传感探头仅由气室和光纤组成,不带有任何电路。因此,可以保证探头的本质安全性和抗电磁干扰能力。分离式设计充分体现了光纤传感的无源和本质安全的特性,特别适合于易燃易爆和强电磁干扰的恶劣环境。

3.2 系统设计原理

设计的系统主要由光源的驱动和温控部分^[10]、传感探头部分、光电转换部分、锁相滤波部分和信号处理部分构成(图2)。其中低频锯齿波由CPU控制DA产生;高频正弦波由运放组成的模拟电路生成;光源温度是由专门IC芯片LTC1923来控制;锁相放大器选用的是AD630;倍频器是由CD4046锁相环和DQ触发器的二倍频电路构成。

将70 Hz的低频锯齿波和50 kHz的高频正弦波叠加后来驱动光源。光源发光通过光纤传输经气

室吸收后,带有气体体积分数信息的光信号被光电二极管(PIN)接收转换成电信号。然后通过前置放大电路和高通滤波电路,去掉低频锯齿波,将因吸收

而变形的 50 kHz 高频正弦输入锁相放大器,跟 100 kHz 高频方波相乘后,再经低通滤波电路就得到了反映气体体积分数的二次谐波信号。

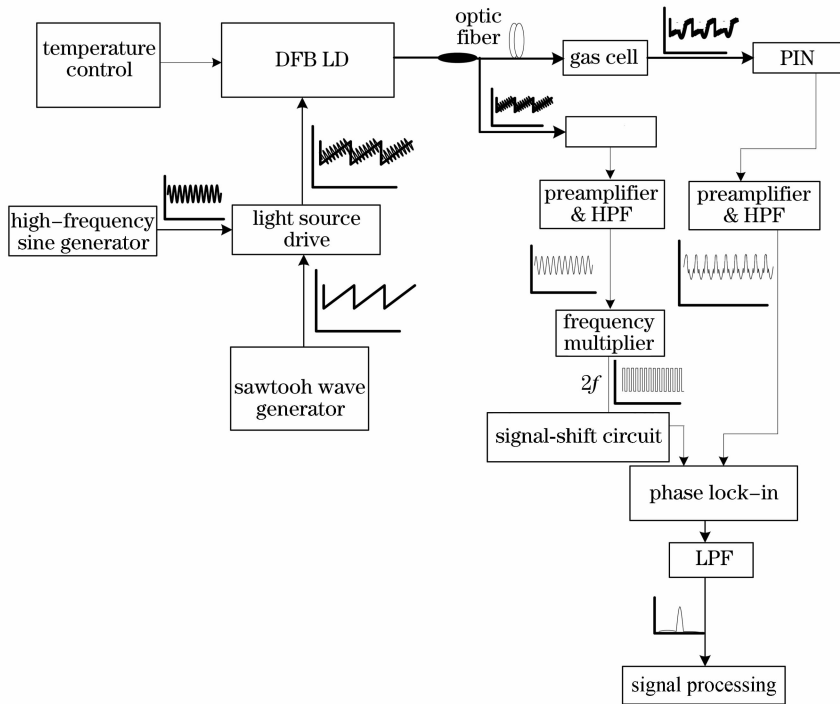


图 2 系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of system

锁相放大实际上是对交变信号进行相敏检波,是利用与被测信号有同频率的锁相关系的参考信号相乘,提出与参考信号同频同相的信号。如果参考信号与被测信号的相位改变,将会导致二次谐波信号幅值大小的改变,严重影响检测结果。

3.3 双光路相位保持设计的结构和思想

在远距离检测中,光纤长度会影响被测信号和参考信号的相位差。选用的是折射率为 1.467 的标准光纤,若光程长度为 100 m,也就是探头与仪表之间距离 50 m。那么光纤传输产生的时间延时 $t = \frac{L \times n}{c} = \frac{100 \times 1.467}{3 \times 10^8} = 0.489 \mu\text{s}$ 。高频正弦为 50 kHz,即 $20 \mu\text{s}$ 一个周期,所以 100 m 的光程会产生 8.802° 的相位滞后。可见在高频电路中,光路产生的相位变化是很明显的。而在电路设计中,各个器件都会产生不确定的延时。因此光路和电路都会产生被测信号和参考信号的相位差,造成测量结果的不确定。

采用的双光路相位保持设计,其结构参见图 1。光源发光通过光纤传输,进入传感探头后经光纤耦合器分光,一路直接沿光纤回来,一路经气室后再通

过光纤回来。两路光信号被光电二极管(PIN)转换为电信号(见图 2),高通滤波后,两路电信号都只含有高频正弦部分。经气室吸收的一路作为被测信号直接进入锁相放大器,另一路经倍频器与移相电路后作为参考信号进入锁相放大器。

可见,双光路相位保持设计包括移相电路和双光路设计两部分。由于电子元器件都会产生电路延时,而且同一型号的不同元件其延时不固定,所以每一块电路板的自身电路延时是不确定的。这样就使得被测和参考信号的相位差不固定,最终的检测值也随之变化,造成了每一套气体检测系统都需要重新进行标定,增加了生产的复杂度。移相电路是用来消除电路本身产生的相位差,使被测和参考信号同相一致,调整一次后可固定不需再次改动。

双光路设计中,本文的参考信号不是采用模拟电路产生的正弦波倍频后的二倍频信号,而是增加了一路不经气室的参考光路。从参考光路上取正弦波,倍频后作为参考信号。这样使得参考信号和被测信号所经过的光路长度保持一致,消除了光路长度变化而产生的相位差变化,实现了探头任意距离的测量。

4 实验结果与分析

在相同环境下接入不同长度的光纤,对 2% 体积比的甲烷气体进行检测,不同长度的光纤造成不同程度的相位延时。实验中每 100 m 就接一个法兰,光强损耗较大。这样处理是为了方便实验结果的观测,实际应用中光强不会有如此大的损耗。

不采用双光路相位保持方法,直接将高频信号

倍频后,送入锁相放大器 AD630 作为参考信号。因为每块电路的延时是固定的,且现象和光路延时相同,这里不重复讨论。为方便分析,直接用移相电路消除电路固有延时,将被测信号与参考信号相位调整同相一致。接入不同长度光纤后的采样信号如图 3。图中左边第一条直线表示仪表内部温度,第二条直线表示光强,曲线表示二次谐波信号。

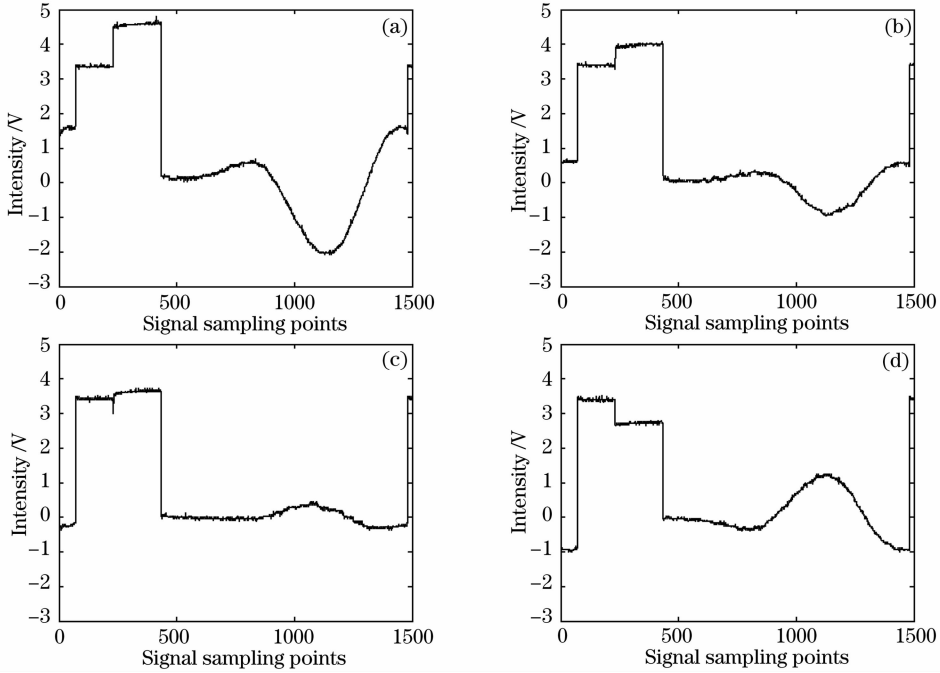


图 3 二次谐波信号

Fig. 3 Second harmonic signal

初始情况时,信号如图 3(a),二次谐波处于反向最大值,光强值为 4.6 V。接入 300 m 光纤后,使得被测信号大约滞后 26.406° ,信号如图 3(b)所示,二次谐波信号幅值极大的缩小,光强由于接入法兰的增加下降为 4.1 V;接入 500 m 光纤后,被测信号大约滞后 44.01° ,二次谐波信号如图 3(c)所示,信号发生翻转,幅值极小,光强为 3.6 V。接入 1000 m 光纤后,二次谐波信号[如图 3(d)]处于正向最大值,此时被测信号与参考信号变成反相一致,光强为 2.7 V。可见,相位差严重影响二次谐波的幅值变化。

标定值如图 5,可见采用双光路相位保持设计后,无论相位如何变化标定值结果基本不变。

采用双光路结构后,比较相位一致和接入 300 m、500 m、1000 m 光纤 4 种情况的二次谐波信号,如图 4 所示。4 种情况的光强值和前面实验一致,为方便观察二次谐波信号变化,图 4 中省去温度和光强信号。接入 300 m、500 m 和 1000 m 光纤后,二次谐波信号没有发生幅值极大的变化和翻转,只是二次谐波信号随光强的减弱而发生了微弱的变化。对采集到的二次谐波信号扣除光强变化处理后得到的

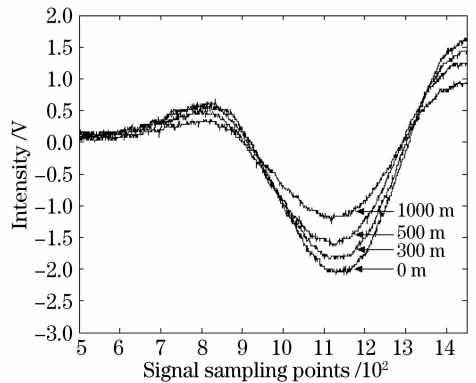


图 4 四种情况的二次谐波信号

Fig. 4 Second harmonic signal in four different situations

电路延时和光路延时现象相同,通过两次实验结果的比较。采用普通方法时,光程的变化会引起二次谐波信号幅值极大的变化。而采用双光路相位保持设计能够保证最终检测结果的稳定性。

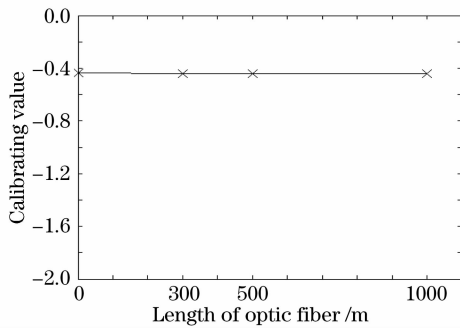


图 5 同体积分数不同光纤长度的标定值

Fig. 5 Calibrating value with different fiber lengths in the same concentration

对采用双光路相位保持设计的仪表进行误差分析。用 0%, 0.5%, 1.5%, 3.5% 四种不同体积分数的气体对仪表进行标定。取 50 次标定值的平均值作为最终的标定值, 不同体积分数对应的标定值及其线性关系见表 1 和图 6。由图 6 可见, 标定值和气体体积分数近似成线性, 做一次线性拟合后得到关系式: $y = 4.2656x + 0.0012$, 式中 y 代表气体体积分数, x 代表标定值。将 2% 体积比气体在 4 种不同光纤距离下的标定值(取绝对值)代入算式, 计算得到相应的气体体积分数值和误差见表 2。由表 2 知, 光纤距离改变使得实际测量值仅有少许变化, 且误差不超过 $\pm 10\%$, 完全满足工业规定。

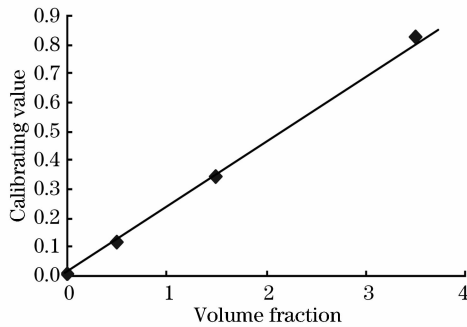


图 6 甲烷气体体积比响应曲线

Fig. 6 Response curve of CH₄ volume fraction

表 1 气体体积比与对应标定值

Table 1 Volume fraction and corresponding calibrating value

Volume fraction / %	0	0.5	1.5	3.5
Calibrating value	0.007	0.1135	0.3436	0.8239

表 2 不同光纤距离下 2% 体积比甲烷气体实际测量值及误差

Table 2 Actual measured value and error of 2% (volume fraction) methane in different fiber distances

Fiber length / m	0	300	500	1000
Calibrating value	0.4586	0.4366	0.4366	0.4431
Volume fraction / %	1.9574	1.8636	1.8636	1.8913
Error / %	-2.13	-6.82	-6.82	-5.43

5 结 论

在采用波长调制法光谱吸收型气体传感器的设计中, 检测信号和参考信号的相位差变化会严重影响检测结果。本文在波长调制的基础上引入了双光路相位保持设计, 使得无论光纤长度和电路自身延时如何变化, 都不会使得检测信号和参考信号的相位差改变, 很好的提高了系统检测结果的稳定性, 实现了恶劣环境中, 任意距离任何位置的气体体积分数的检测。

参 考 文 献

- Linnerud P. Kaspersen, T. Jæger, Gas monitoring in the process industry using diode laser spectroscopy[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**: 297~305
- Chen Jiuying, Liu Jianguo, Zhang Yujun *et al.*. Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 350~353
陈玖英, 刘建国, 张玉钧 等. 调谐半导体激光吸收光谱自平衡检测方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 350~353
- Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1639~1642
王 健, 黄 伟, 顾海涛 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1639~1642
- Hui Xia, Wenqing Liu, Yujun Zhang *et al.*. An approach of open-path gas sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 437~440
- H. I. Schiff. Measurement of atmospheric gases[C]. *SPIE*, 1991, **1433**:
- H. I. Schiff, G. I. Mackay, J. Bechara. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques[M]. New York: Wiley, 1994
- Shao Jie, Gao Xiaoming, Yuan Yiqian *et al.*. Experimental research on the sensitivity of wavelength modulation by signal processing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10): 4638~4642
邵 杰, 高晓明, 袁恽谦 等. 信号处理改善波长调制光谱灵敏度的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4638~4642
- D. J. Brassington. Advances in spectroscopy[J]. *Spectroscopy in Environmental Science*, 1994, **24**: Wiley, New York
- Peter Werle, A review of recent advances in semiconductor laser based gas[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 1998, **54**: 197~236
- Wang Lixin, Ran Changyan, Bai Junjie *et al.*. Demodulation system of spectrum absorptive optical fiber gas sensor[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4): 8~10
王立新, 冉昌艳, 柏俊杰 等. 光谱吸收型光纤气体传感器解调系统的研究[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(4): 8~10
- Zhang Gang, Liu Dongbo, Chen Youpin *et al.*. Driving and controlling of light source for fiber-optic sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006, **5**: 45~46
张 冈, 刘东波, 陈幼平等. 光纤传感器中光源的驱动与控制[J]. *仪表技术与传感器*, 2006, **5**: 45~46