

## 锯齿波调制半波扫描技术对甲烷检测系统的性能改进

曾祥豹<sup>1</sup>,王海旭<sup>1</sup>,王忠民<sup>2</sup>,周天水<sup>1</sup>,崔洪亮<sup>1</sup>,常天英<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 仪器与电气工程学院,吉林 长春 130012;

2. 山东省科学院自动化研究所,山东 济南 250014)

**摘要:**为了能够在复杂的环境下实现甲烷气体浓度的高精度和高稳定性检测,在基于光谱吸收原理的光纤甲烷检测系统的基础上,提出了利用锯齿波调制的半波扫描技术,较大程度改进了系统的性能指标。采用锯齿波调制光源的方式,同时对光信号进行波长调制和强度调制,实现对甲烷气体的洛伦兹吸收线型扫描。锯齿波调制的方式能够解决信号链路噪声、环境噪声等随机信号对光强造成的干扰,消除光源波长漂移对检测带来的影响,且实现了积分处理,进一步提高检测精度;但由于甲烷吸收光谱的对称性,采用通用的全波扫描方式,气体吸收光强后进行微分处理会出现正弦型曲线,无法准确确定吸收的光强所对应的数字量;而采用半波扫描方式,气体吸收光强后进行微分处理只出现凹型曲线,可以准确确定吸收的光强所对应的数字量。实验结果表明:采用锯齿波调制的半波扫描方式,可以准确测得甲烷气体浓度;测量范围为 0%~10%,精度由 100 ppm 提升到 10 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>),稳定性由 0.3% 提升到 0.01%。该系统经过改进后在复杂环境下受温度影响小,精度高,稳定性好,抗干扰能力强。

**关键词:**半波扫描; 锯齿波调制; 甲烷检测; 凹型曲线

**中图分类号:** O659.2; X831 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0817003

## Methane detection system performance improvement based on sawtooth modulation half-wave scanning technology

Zeng Xiangbao<sup>1</sup>, Wang Haixu<sup>1</sup>, Wang Zhongmin<sup>2</sup>, Zhou Tianshui<sup>1</sup>, Cui Hongliang<sup>1</sup>, Chang Tianying<sup>1</sup>

(1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

**Abstract:** In order to achieve high accuracy and high stability of methane gas concentration in complex environment, this paper proposed the half-wavelength scanning detection method which using sawtooth modulation based on spectral absorption principle, and this method greatly improved the performance index of the system. In the process of detection, the method of sawtooth modulation realized wavelength modulation and intensity modulation of Distributed Feedback (DFB) laser, scanned Lorentzen absorption linear of methane gas. And it improved the accuracy of detection through eliminating the measurement error and the influence of laser wavelength drifting. Due to the symmetry of methane absorption spectra,

收稿日期:2016-12-05; 修订日期:2017-01-15

基金项目:海洋公益性行业科研专项(201405026-01); 国家科技支撑计划项目(2012BAK04B03);

科技部国际部国际合作项目(2013DFA11550)

作者简介:曾祥豹(1991-),男,硕士生,主要从事近红外光谱吸收方面的研究。Email:xiangbaozeng@sina.com.cn

导师简介:崔洪亮(1956-),男,教授,博士,主要从事光纤传感与半导体技术等方面的研究。Email:hcuai@jlu.edu.cn

relative to full-wave scanning would appears sine curve after differential circuit and could not establish the relation between absorption intensity and digital value, the half-wave scanning would appear concave curve after differential circuit, and could establish the relation between absorption intensity and digital value. The experimental results show that this method could accurately measure methane gas concentration, and the measurement range of methane gas concentration is 0%–10%, the accuracy increased from 100 ppm to 10 ppm ( $1 \text{ ppm}=10^{-6}$ ), stability is increased from 0.3% to 0.01%. The system was not affected by temperature in complex environment and has high accuracy, good stability, and strong anti-interference capacity after improvement.

**Key words:** half-wave scanning; sawtooth modulation; methane detection; concave curve

## 0 引言

甲烷气体易燃易爆,在煤矿、城市地下天然气管道、污水处理厂和家庭天然气使用中都有可能发生甲烷气体泄露引起火灾或爆炸的问题,因此甲烷气体的检测一直以来都是备受关注的焦点问题。煤矿、城市地下管道和排污管道等检测环境,在检测过程中存在很大的复杂性和艰难性。随着近红外气体检测的发展,检测方式层出不穷。从波长范围上来区分,主要有光纤甲烷传感器(近红外)和红外甲烷传感器(中红外);从光源上来区分,分为窄带光源(主要包括激光器和分布反馈式半导体激光器)和宽带光源(发光二极管和红外白炽灯)两种;从检测方法上来区分,则以基于直接吸收检测法、光声光谱检测法、差分吸收检测法以及谐波检测法等红外传感系统为主<sup>[1]</sup>。近几年来,对于红外甲烷气体传感器的研究则主要集中在如何有效地提高系统检测灵敏度和测量精度,同时确保系统具有较高的稳定性和抗干扰能力等方面。但是在实际的检测过程中,环境温度的干扰、光学器件的匹配、光功率的大小选择等都会对检测产生较大的影响<sup>[2]</sup>。

目前,香港理工大学利用光纤光热分析法将气体检测精度提高到了 2 ppb( $1 \text{ ppb}=10^{-9}$ )的水平;国内部分高校在实验室环境中,利用长光程吸收池,也做到了 ppb 级别。

该系统面对复杂的环境,定位于实际应用,采用直接吸收检测的方法,其气室长度仅为 13 cm,在同类的吸收检测系统中,大部分系统受温度波长漂移等影响无法对准吸收峰,导致系统的精度为 1000~

10 000 ppm( $1 \text{ ppm}=10^{-6}$ ),稳定性在 1%左右,无法适应恶劣环境,难以满足实际应用要求。在此基础上,文中提出了采用锯齿波调制扫描的方式。由于锯齿波调制扫描包括强度调制和波长扫描调制,故该方法不但解决了光纤甲烷气体浓度检测方法中信号链路、环境噪声等随机信号对光强造成干扰从而带来的检测误差问题,还能够消除光源波长漂移对检测带来的影响,进一步提高了检测的精度。但在采用锯齿波扫描的基础上,若对甲烷的吸收曲线进行目前通用的全波扫描,后期处理对其进行微分处理,若存在甲烷,微分后会出现正弦型模拟量,导致检测量不准确;故提出了采用半波扫描方式,最后得到的仅仅是凹型,可以实现对甲烷气体吸收量的准确检测,得到了更加精确的结果。实验证明:使用该检测方法可以准确得到甲烷相应浓度下对应的数字量,可以进行准确地标定,稳定性得到了极大的提升;且该方法解决了实际中外在环境由于温度使激光器波长漂移,光链路衰减等造成的影响,可以在各种环境下进行准确的测量,该系统具有适应能力强、可靠性高等优点。

## 1 系统的检测原理

### 1.1 检测的基本原理

比尔-朗伯定律是衡量气体吸收的基本定律。根据气体吸收定律和波长调制光谱学的原理,确定了系统的基本原理。

在近红外区域,气体有许多组合频率和泛频的吸收线,甲烷气体的组合频率的吸收波长分别为 1.33  $\mu\text{m}$  和 1.66  $\mu\text{m}$ ,甲烷在这两个波长附近有较强的吸收峰。结合可调谐半导体激光器的调谐特性,经

过一系列实验,发现该激光器的波长在可调谐范围在 1645.5nm 处,甲烷气体对光吸收最强;且在 1645.5nm 附近不是联系的吸收峰,是单一的吸收峰,可以方便进行锯齿波扫描;故把甲烷吸收的中心波长定位为 1645.5nm。

根据光谱吸收原理和甲烷吸收的中心波长的选择,结合甲烷在其中心波长处的洛伦兹线型吸收谱线,采用锯齿波调制的方式来驱动激光器进行波长扫描和强度扫描,如图 1 所示。其中,λ<sub>1</sub> 为甲烷气体对应的洛伦兹线型的吸收谱线,λ<sub>2</sub> 为对应激光器扫描后的线型,λ<sub>0</sub> 为甲烷气体对应的中心吸收波长。该吸收实现了积分的效果,提高了检测灵敏度。

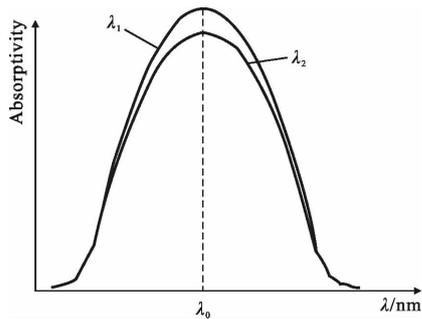


图 1 波长扫描式直接吸收检测原理

Fig.1 Wavelength scanning direct absorption detection principle

### 1.2 锯齿波扫描信号调制原理

锯齿波扫描的方法不但能够解决光纤甲烷气体浓度检测方法中信号链路、环境噪声等随机信号对光强造成干扰从而带来的检测误差问题,还能够消除光源波长漂移对检测带来的影响,进一步提高了检测的精度。其具体的信号调制方式如下。

采用锯齿波调制信号作为光源的驱动电流,并考虑光源的波长漂移,得到光源发出的光信号波长和强度随调制信号变化的变量为:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \lambda_m \frac{(t-nT)}{T} + \lambda_n, nT \leq t \leq (n+1)T \quad (1)$$

$$I_0(t)' = I_0 + I_m \frac{(t-nT)}{T}, nT \leq t \leq (n+1)T \quad (2)$$

式中:λ<sub>0</sub> 和 I<sub>0</sub> 表示光源发出的光信号起始波长和强度;λ<sub>m</sub> 和 I<sub>m</sub> 表示波长和强度的调制范围;λ<sub>n</sub> 表示光源的波长漂移,是一个随时间缓慢变化的数值,对于几十毫秒的处理周期,可以认为是一个直流流量;T 表示调制周期,一般选择为几十毫秒量级。通过合理选择波长调制范围 λ<sub>m</sub>, 使其完全覆盖甲烷气体吸收谱

线宽度和光源波长漂移之和。调制后光源发出的光信号波长调制曲线和强度调制曲线如图 2 所示。

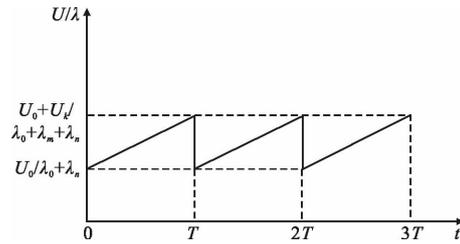


图 2 光源波长调制和强度调制曲线

Fig.2 Light source wavelength and intensity modulation curves

根据比尔-朗伯定律,并考虑信号链路损耗和其他环境随机噪声对光强造成的干扰,经过甲烷气体吸收后的光强为:

$$I(t) = K \left( I_0 + I_m \frac{(t-nT)}{T} \right) e^{-\alpha(\lambda(t))CL} - I_n, nT \leq t \leq (n+1)T \quad (3)$$

式中:I<sub>n</sub> 表示信号链路损耗和其他环境随机噪声对光强造成的衰减,严格意义上讲,它是与波长和时间相关的变量,但是由于甲烷气体吸收谱线很窄,所以波长调制范围很小,而且处理周期又很短,所以可以认为 I<sub>n</sub> 是一个直流量;K 表示在光传输的过程中,经过一系列的光学器件造成的按比例损耗。由于其光学厚度很小,故可忽略高阶小项。

得到:

$$I(t) = KI_0 + KI_m \frac{(t-nT)}{T} - KI_0 \alpha(\lambda(t))CL - I_n, nT \leq t \leq (n+1)T \quad (4)$$

然后,对信号 I(t) 作微分处理,得到:

$$\bar{I}(t) = K \frac{I_m}{T} - KI_0 \alpha'(\lambda(t))CL, nT \leq t \leq (n+1)T \quad (5)$$

被测气体甲烷浓度为 0% 时, Ī(t) 是一条直线,大小等于 I<sub>m</sub>/T,如图 3 所示。甲烷浓度不为 0% 时,在每个周期的开始时刻到 t<sub>1</sub> 时刻,光源波长未进入甲烷气体吸收谱线,不存在吸收衰减, Ī(t) 依然是一条直线;从 t<sub>1</sub>~t<sub>2</sub> 时刻,光源波长慢慢靠近甲烷气体吸收谱线中心波长,吸收造成的衰减增加,并在 t<sub>2</sub> 时刻达到最大值,这一阶段 Ī(t) 随着 I(t) 曲线斜率经历先变小后变大的过程,到 t<sub>2</sub> 时刻恢复到 I<sub>m</sub>/T 大小;从 t<sub>2</sub>~t<sub>3</sub> 时刻,光源波长慢慢远离吸收中心波长,吸收造成的衰

减小,直到为 0,这一阶段  $\bar{I}(t)$  随着  $I(t)$  曲线斜率经历先变大后变小的过程,直到  $t_3$  时刻恢复到  $\frac{I_m}{T}$  大小;从  $t_3$  时刻到周期结束,光源波长离开吸收谱线,  $\bar{I}(t)$  为一条直线。如图 4 所示。

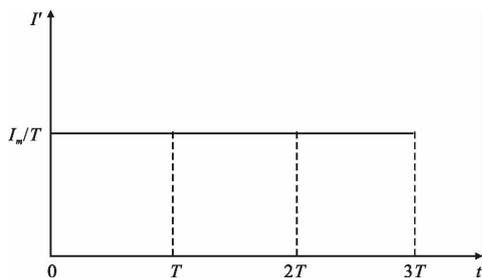


图 3 无甲烷气体时,微分处理后的光强曲线

Fig.3 Light intensity curves when there is no methane gas after differential processing

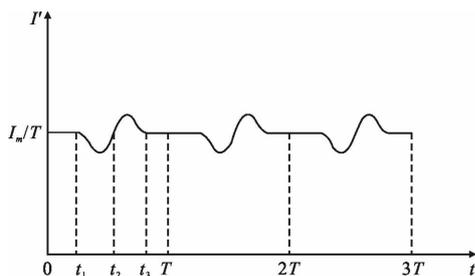


图 4 有甲烷气体时,微分处理后光强曲线

Fig.4 Light intensity curve when methane gas obtained after differential processing

### 1.3 半波扫描与全波扫描的比较分析

由于采用锯齿波扫描的调制方式,根据甲烷气体的洛伦兹型吸收谱线,在该吸收谱线上,必然存在一点与该锯齿波扫描的斜线可以相切,因此在吸收的过程中会出现与该扫描斜线同斜率的点,进行微分后,则会表现为吸收曲线的最低点或最高点。由于洛伦兹线型的对称性,故经过微分后会出现正弦型的波形曲线。若采用半波吸收的方式,则只会出现一半的正弦型曲线,即凹型曲线。其表达式为:

$$I_0 = A \sin(ax+b) + C \quad (6)$$

由图 4 可以看出,在全波扫描的情况下,出现了完整的正弦型曲线,即一个完整的周期情况下,由于模数转换是对电压信号的转换,进行数字量转换后,得出的结果会是数字量的值不变化;为了能够准确

的表现出浓度所对应的具体的数字量,采用半波扫描的方式,即在图 4 的  $t_2$  点则停止扫描,得到的是半个周期的正弦曲线,这样则可以得到浓度所对应的准确的数字量,如图 5 所示。

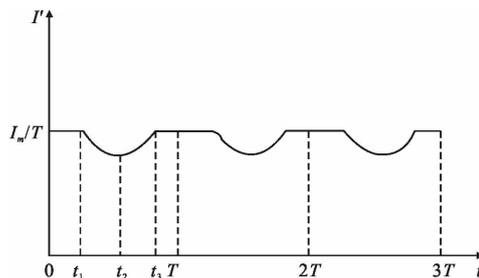


图 5 半波扫描条件下,有甲烷气体微分处理后的光强曲线

Fig.5 Light intensity curve under half wave scanning conditions when methane gas obtained after differential processing

### 1.4 锯齿波调制半波扫描的实施方法

锯齿波调制为半波扫描的具体示意图如图 6 所示,锯齿波调制信号对应到甲烷气体吸收谱线的中心位置,窄带激光器的输出也将随之移动到甲烷气体吸收谱线的中心位置。

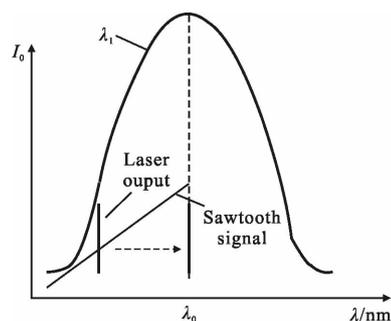


图 6 锯齿波调制为半波扫描示意图

Fig.6 Sawtooth modulation schematic for half-wave scanning

具体调节方式:首先确定甲烷气体吸收谱线的中心波长,然后查询对应激光器的资料,确定在何种温度下进行扫描,且确定扫描的宽度。扫描宽度决定了激光器的输出电流大小和输出电流的变化范围。运用光谱仪,在恒定温度下调节激光器的输入电流和输入电流范围,直至激光器的扫描最大点刚好对应于甲烷吸收谱线的中心波长。

在实验中,该系统采用 35.03 °C 的恒定温度下进行锯齿波调制,扫描宽度为 0.05 nm,输出电流强度为 50~90 mA,输出的扫描功率为 3~5 mW,完全实现

了锯齿波调制的半波扫描效果。

## 2 系统设计与结构

### 2.1 系统整体结构图

该系统整体结构图如图 7 所示, 包括了激光器模块、光路模块、电路模块和中心处理单元模块。

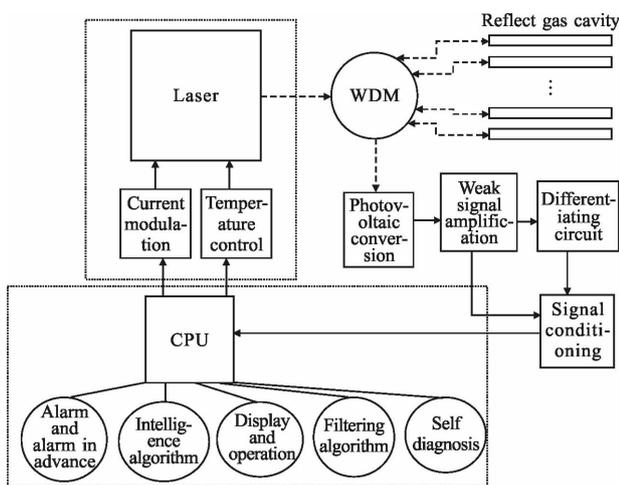


图 7 系统整体结构图

Fig.7 Overall system architecture

激光器模块包括了驱动模块和温控模块。激光器采用的是日本 NEL 的 1 650 nm 的 DFB 激光器, 线宽为 2 MHz, 调节范围为 1 625~1 655 nm; 驱动模块采用的是自制的恒流源驱动; 温控模块采用的激光温控专用模块, 温控的变化要 $<0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变化。

光路模块主要由气室和 WDM 组成。WDM 模块是分束器, 将光分为 8 路出射并接收返回的光; 气室是经过改进后的反射式气室(解决了干涉问题), 气室长度为 13 cm, 满足测量要求。

### 2.2 锯齿波调制半波扫描的驱动设计

激光器锯齿波调制的具体方式如图 8 所示, 该

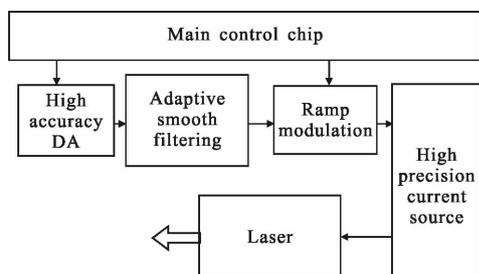


图 8 激光器产生锯齿波信号框图

Fig.8 Block diagram of laser generating sawtooth wave signal

调制装置包括高精度的 DA 转换, 适应性平滑滤波, 调制, 高精密电流源到激光器输出。整个的驱动过程: 主控模块给出递增的数字信号到达数模转换, 形成阶梯状的锯齿波信号; 锯齿波信号经过适应性平滑滤波, 其与 DA 的调制频率相关, 然后形成平滑的锯齿波信号; 将锯齿波信号再次进行调制后, 进入到高精度电流源中, 则可以产生锯齿波电流来驱动激光器输出满足条件的光。

该驱动的难点在于, 需要合理的调整波长的扫描宽度, 使其对半波长进行完整的扫描, 且需要配合温控来实现半波扫描。

目前, 该系统的扫描宽度为 0.05 nm, 温度设定为  $35.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 该温度下扫描时刚好扫描完整的半波且最后位于甲烷吸收光谱的峰值处; 在具体的情况下需要具体的调试来完成。

## 3 实验测试结果

### 3.1 采用锯齿波调制的半波扫描与全波扫描测试结果比较

采用上述系统进行实验测试, 可以看到锯齿波调制信号与对应的测量结果的电压信号输出图。分别为在无甲烷气体条件下的电压信号输出图; 有甲烷气体条件下, 锯齿波调制下全波扫描的测量结果电压信号输出图和锯齿波调制下半波扫描的测量结果电压信号输出图。

下图为实验测试的结果, 其中, CH1 是锯齿波调制的电路处理后的电压信号波形图, CH2 是气体吸收经过电路处理后的电压信号波形图, 图 9 是在锯



图 9 锯齿波调制情况下, 无甲烷气体的吸收波形图

Fig.9 Waveform without the absorption of methane gas under sawtooth wave modulation

齿波调制的条件下, 无甲烷气体的电压信号波形图, 可以看到锯齿波调制下没有吸收, 出现的是水平波

形;图 10 是在全波扫描的条件下有甲烷气体的电压信号波形图,可以看到锯齿波调制被吸收,但出现了正弦型曲线;图 11 是在半波扫描条件下有甲烷气体的电压信号波形图,可以看到,锯齿波调制被吸收,出现了凹型曲线。

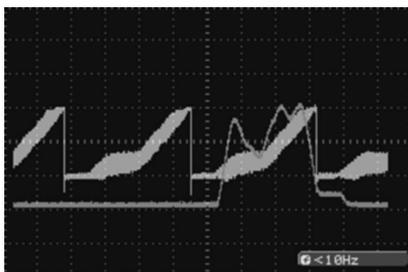


图 10 全波扫描条件下,甲烷气体的吸收波形图

Fig.10 Methane gas absorption waveform under the full-wave scanning conditions

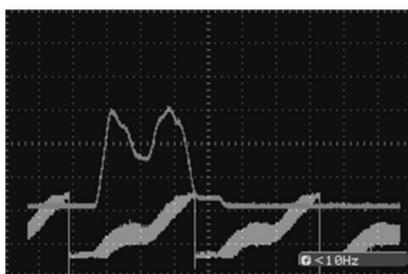


图 11 半波扫描条件下,甲烷气体的吸收波形图

Fig.11 Methane gas absorption waveform under the half-wave scanning condition

由图中的实验结果可以看出:采用锯齿波调制的半波扫描出现的是凹型曲线,即正弦曲线半个周期状态下的情况,其可以得到更加准确的测量结果。

### 3.2 锯齿波调制的半波扫描条件下甲烷浓度标定

#### 实验及结果分析

在锯齿波调制的半波扫描的条件下和改进前的状态下,对 0.000%;1.060%,4.763%,5.050%和9.999%数字量的标定,该系统的测量范围 0%~10%,对其对应浓度和数字量进行测试,由于采用的是标准气体,为了避免测量中的偶然误差和粗大误差,每个浓度至少测试 1000 次然后取最优值(即排除上述误差后的平均值),对其进行了线性拟合和线性回归的标定,其大体符合线性特征,如图 12 所示。其对应浓度的数字量如表 1 所示,对应的拟合曲线见图 12;在 5.050%条件下的对应数字量如表 2 所示,在 5.050%

条件下的数字量变化趋势如图 13 所示。

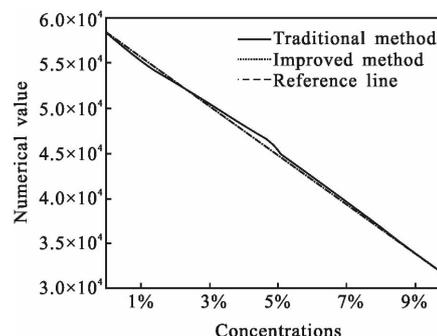


图 12 不同浓度对应数字量的拟合直线

Fig.12 Fitting a straight line corresponding to different concentrations of the digital

表 1 甲烷不同浓度对应的数字量

Tab.1 Different methane concentrations corresponding to digital

Gas concentration	Digital before improvement	Digital after improvement	Number of measurements
0.000%	58 354	58 354	1 000 times
1.060%	54 950	55 450	1 000 times
4.762%	46 250	45 400	1 000 times
5.050%	45 050	44 650	1 000 times
9.999%	31 210	31 210	1 000 times

表 2 在 5.050%条件下数字量的变化

Tab.2 Digital change at 5.050%

Count	Digital before improvement	Digital after improvement
1	45 053	44 653
2	44 955	44 626
3	45 351	44 663
4	45 057	44 624
5	44 952	44 616
6	45 255	44 635
7	45 156	44 655
8	44 957	44 664
9	44 921	44 693
10	45 324	44 683
...	...	...

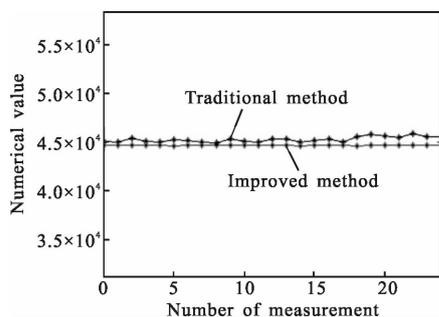


图 13 在 5.050% 条件下数字量变化图

Fig.13 Digital change diagram at 5.050%

由图 12 可以看到, 在该锯齿波调制的半波扫描情况下, 在不同浓度下, 其数字量与相应的浓度线性度良好, 而改进前相对于标准线, 其具有较大的偏差。经过计算, 其对应准确浓度的最大偏差为 0.010%, 相对变化量为 0.001%, 根据其最大偏差可知, 其精度可得到为 10 ppm; 改进前的最大偏差 0.304%, 相对变化量为 0.03%, 其精度可得到为 100 ppm; 改进后系统的精度得到了较大的提升。

由表 2 和图 13 可以看到, 在气体浓度为 5.050% 的条件下的对应的数字量的变化情况, 改进后相对于标定量的最大偏差为 0.016%, 相比于改进前相对于标定量的最大偏差 0.306%, 其稳定性得到了极大的提升; 从图 13 中可以看出, 相对于整体的数字量变化, 改进后其稳定性很好。

## 4 结 论

(1) 提出锯齿波调制扫描的方式, 解决了气体浓度检测方法中由于信号链路、环境噪声等随机信号对光强造成干扰从而带来的检测误差问题, 并且消除光源波长漂移对检测带来的影响, 通过扫描实现了类似积分的效果, 大大提高了系统的灵敏度和精度。相对于直接吸收的方式对准气体吸收峰, 该方法将原始的检测方法中 1 000~10 000 ppm 的检测精度提高到了 100 ppm, 且提高了系统对环境的适应性。

(2) 在锯齿波调制的基础上提出了基于锯齿波调制的半波扫描方式, 解决了锯齿波调制中全波扫描出现数字量标定不准确的问题, 使得系统的精度由 100 ppm 达到了 10 ppm, 且系统的稳定性得到了极大地提高。

(3) 利用锯齿波调制的半波扫描的方式, 设计并

实现了光纤甲烷检测系统。实验结果表明: 在 0%~10% 条件下测试, 系统精度在 10 ppm 左右, 稳定性优于 0.01%, 采用该方法的系统测试的数据具有很好的重复性, 最大相对误差为 0.01%。

(4) 在低浓度的条件下, 可以近似于线性拟合, 但在高浓度的环境条件下, 需进行曲线的拟合标定, 达到更高的精度。同时, 通过改变激光器相应的波长, 可以测试各种不同的气体。

## 参 考 文 献:

- [1] Tan Qiulin, Yang Mingliang, Xiong Jijun, et al. Parameters correction function method for concentration calculation and compensation in IR optical gas measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1396-1400. (in Chinese)
- [2] Guo Tiantai, Hong Bo, Pan Zengrong, et al. Application of improved SVM in quantitative analysis of mine gas concentration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 617011. (in Chinese)
- [3] Chen Xiao. Multi-gas detection system designed to apply a single ultra-narrow linewidth laser [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(7): 1496-1500. (in Chinese)
- [4] Zhen Shouguo, Lin Miao, Zhang Jian, et al. The design and implementation of trace N<sub>2</sub>O gas detection system [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(10): 2145-2160. (in Chinese)
- [5] Shi Guanghui. Improved method for semiconductor laser coupling[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 343-352. (in Chinese)
- [6] Tian Kun, Zhou Yonggang, Ma Xiaohui, et al. Surface emitting distributed feedback semiconductor laser[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 51-64. (in Chinese)
- [7] Zhang Keke. Spectrum absorption optical fiber gas detection theory and technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [8] Krzempek K, Lewicki R, Nahle L, et al. Continuous wave, distributed feedback diode laser based sensor for trace-gas detection of ethane [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(2): 251-255.
- [9] Gerark D, Elfed L, Colin F, et al. Low concentration monitoring of exhaust gases using a UV-based optical sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(5): 685-691.
- [10] Duvai M A. Review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(3): 8-17.
- [11] Li Sanguo. Optical fiber gas sensor for remote detection of methane gas in coal mines [D]. USA: Stevens Institute of Technology, 2006.