文章编号: 1001-5078(2008)05-0462-03 ·光电技术与系统·

提高可调谐激光光谱气体检测精度的研究

邓广福,刘光达,周志坚
(吉林大学仪器科学与电气工程学院,吉林 长春 130026)

摘 要:利用可调谐激光光谱技术检测气体浓度时,在气体浓度较高或气体吸收路径较长的情况下,用简单的线性关系逼近朗伯-比尔定律的指数关系,会造成较大的误差,甚至错误的结果。在不改变气体吸收路径长度,保证检测灵敏度的前提下,采用分段线性插值和谐波分析的方法,将浓度区间范围为 0～100%的气体,每隔 10%划分为一个子区间,在各个子区间内采用不同的比例系数,从而可以很好地逼近理论曲线,并可以消除光强波动等因素的影响,大大提高系统的检测精度。

关键词:可调谐激光光谱;浓度检测;分段线性插值;谐波分析
中图分类号: TP206 **文献标识码**: A

Research on Improving Gas Detection Precision Based on Tunable Laser Spectroscopy

DENG Guang-fu, LIU Guang-da, ZHOU Zhi-jian
(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: When we detect gas concentration by the technology of tunable laser spectroscopy, under the condition of high gas concentration and long gas absorption path, we can use simple linear relation as the approximation of the exponential relation of Lambert-Beer's law, as a result, we will get big errors and wrong result. On the premise that we never change gas absorption path length and ensure detection sensitivity, we adopt the method of piecewise linear interpolation and harmonic analysis. By dividing some sub-range every 10% in the range of gas concentration and adopting different proportion factor in each sub-range, we can get good curves approaching to theory's and improve much detection precision by eliminating the effect of many factors, such as the fluctuations of the optical power.

Key words: tunable laser spectroscopy; concentration detection; piecewise linear interpolation; harmonic analysis

1 引 言

可调谐半导体激光光谱(TDLAS)采用高单色性的半导体激光器作为光源,对气体分子的一条孤立的吸收谱线进行测量,可避免其他气体吸收光谱的干扰[1-2]。目前,一般通过检测气体吸收光谱的二次谐波来获取气体浓度,具有灵敏度高、响应速度快等特点[3-4],但在实际应用中,易受光强波动、粉尘及视窗污染等因素的影响,造成检测精度降低。

在通常的分析中,一般假设被测气体的浓度很低,近似认为气体吸收的光功率与气体的浓度之间为线性关系,从而造成气体浓度较高或气体吸收路径较长时,检测精度很差,甚至给出错误的结果。本文对可调谐半导体激光光谱理论进行了分析,采用分段线性插值的方法,在不同的范围内采用不同的比例系数,利用气体吸收光谱二次谐波和一次谐波的比值作为系统输出,大大提高了系统的检测精度。

2 线性近似产生的问题

物质分子在不同的条件下,吸收或发射光谱的波长、强度、偏振态等情况,和该物质的结构特征有

作者简介:邓广福(1980-),男,博士研究生,主要研究方向为激光光谱检测技术。E-mail: elecair@163.com
收稿日期: 2007-11-14

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

着固有的关系,通过检测气体对特定波长光的吸收程度,就可确定气体的成分及浓度。气体吸收满足朗伯 - 比尔定律:

$$I(\nu) = I_0(\nu)\exp(-\alpha(\nu)\cdot C\cdot L) \quad (1)$$

式中,$I_0(\nu)$为输入光强度,单位 W;$I(\nu)$为输出光强度,单位 W;$\alpha(\nu)$为频率 ν 处介质的吸收系数,单位为 $10^6 m^{-1}$;C为气体浓度,单位 10^{-6};L 为吸收路径的长度,单位 m。

由于气体的吸收系数很小,在气体浓度很低或吸收路径很短的的情况下,一般认为:

$$\alpha(\nu)\cdot C\cdot L \ll 1 \quad (2)$$

因此,式 (1)可近似为线性关系:

$$I(\nu) = I_0(\nu)(1-\alpha(\nu)\cdot C\cdot L) \quad (3)$$

但是,当气体浓度很高或气体吸收路径很长的情况下,式 (2)并不成立,用式 (3)的线性关系近似式 (1)的指数关系会造成很大的误差,甚至产生错误的检测结果。如图 1所示为采用式 (3) (虚线)和式 (1) (实线)得出的检测结果,波长为 1653.7nm,气体吸收路径长度为 0.1m如图 1(a)所示和 0.3m如图 1(b)所示,气体浓度范围为 0～100%。由图可以看出,气体的吸收路径越长,气体的浓度越高,采用线性关系检测所产生的误差就越大;在气体吸收路径长度为 0.1m,气体浓度大于 20% (在 0.3m条件下,这个值会更小)时,采用式 (3)得出的结果已经大大超出正常使用所要求的误差范围,这也是采用光谱吸收技术的气体传感器的检测上限被限制在 20%以内的原因。

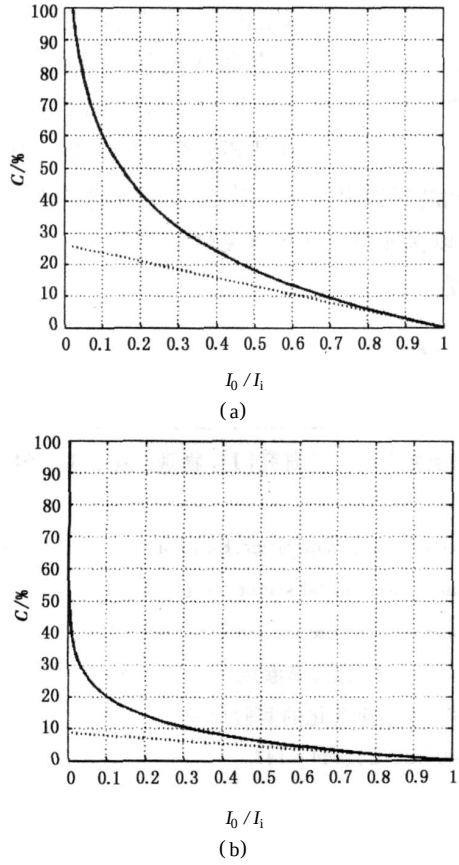


图 1指数关系与线性关系的比较

(a) 0.1m气体吸收路径; (b) 0.3m气体吸收路径

Fig 1 comparison of exponential relation and linear relation

(a) 0.1m gas absorption path; (b) 0.3m gas absorption path

3 分段多项式插值及谐波分析

当气体浓度很高或气体吸收路径很长的情况下,式 (2)已经不成立,从而也不能用简单的线性关系来近似朗伯 - 比尔定律所表达的指数关系,而高次多项式插值的起伏十分大,虽然在结点上和被插函数的值一致,但结点外的值可能偏离函数值很远。可以通过减小吸收气室的长度来满足式 (2)所示的条件,但减小气室长度会增加吸收信号检测的难度,并且会降低系统的检测灵敏度。因此在保证检测灵敏度的前提下,采用分段多项式插值方法来逼近朗伯 - 比尔定律的指数曲线,可以获得较高的精度,并可为后续的数据处理提供方便。

将浓度区间范围为 0～100%的气体,每隔 10%划分为一个子区间,则可得到 10个子区间,及 0, 10%, 20%, …, 90%, 100%共 11个结点。在每个子区间内分别采用式 (4)所示的分段线性插值函数来近似:

$$I(\nu) = I_0(\nu)(b_i - k_i\cdot\alpha(\nu)\cdot C\cdot L) \quad (4)$$

式中,b_i和 k_i 为通过实验标定的常数值,在各个子区间内互不相同。

用一频率为 ω的正弦小信号对半导体激光器的驱动电流进行调制,并用归一化的洛仑兹函数来描述气体分子的吸收线型,经傅里叶级数分析,可得到各个子区间内气体吸收信号的一次谐波和二次谐波分量[5]:

$$I_f = b_i\cdot\eta\cdot I_{\nu_0} \quad (5)$$

$$I_{2f} = k_i\cdot m\cdot\alpha_0\cdot C\cdot L\cdot I_{\nu_0} \quad (6)$$

式中,m 为常数;当光源中心波长与气体光谱的吸收峰对准时,m 的值最大,为 0.343。

由式 (5)和式 (6)可得:

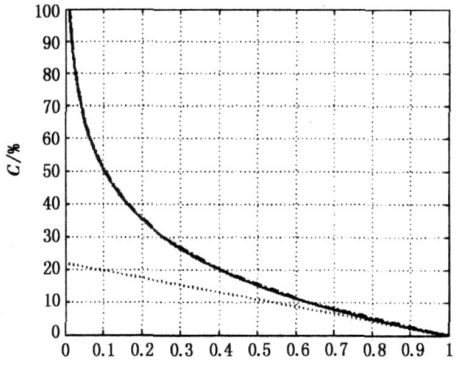
$$\frac{I_{2f}}{I_f} = -\frac{k_i}{b_i}\cdot\frac{m}{\eta}\cdot\alpha_0\cdot C\cdot L \quad (7)$$

可见,在各个子区间内,二次谐波和一次谐波的比值与气体的浓度 C有关,且不含有 I_0 项,用其作为系统的输出可以消除光强波动等因素带来的干扰。

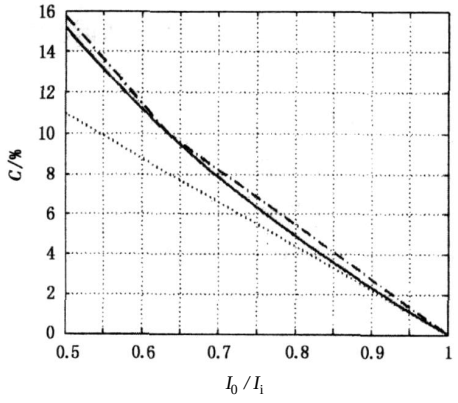
© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4 系统标定及实验分析

取纯净的甲烷气体和高纯氮气混和,配成 0～100%范围内 11组不同浓度的气体样品,每组样品的浓度间隔为 10%。光源采用中心波长为 1653.7nm、额度功率 2mW的半导体激光器,调制频率为 10kHz,吸收气室长度为 12cm,在常温常压下,将配置好的气体样品分别通入密闭气室,测得相应的光透过率、信号的二次谐波和一次谐波,然后根据式 (4)计算出各个浓度区间相应的比例系数 b_i 和 k_i。每次通入气体样品前后,必须用高纯氮气反复冲洗气室,直至气室干净。表 1为实验所得各个浓度区间的 b_i 和 k_i 值。图 2(a)为分段线性插值方法、理论曲线和传统近似方法所得结果的比较,图 2(b)为图 2(a)的局部放大,实线为理论曲线,虚线为传统线性近似方法所得结果,点划线为分段线性插值方法所得结果。由图 2可以看出采用分段线性插值方法与理论值比较吻合,误差很小,大大降低了浓度较高时传统线性近似产生的误差。图 3为气体浓度与谐波比值的关系,可以看出在各个子区间内,气体浓度与谐波比值呈良好的线性关系。



(a)



(b)

图 2 系统所得结果、理论曲线和传统近拟方法的比较

Fig 2 comparison of result, theory's curve and traditional approximate method

表 1 各个浓度区间的 b_i 和 k_i 值

Tab. 1 b_i and k_i in each sub-range of concentration

浓度	0～10%	10%～20%	20%～30%	30%～40%	40%～50%	50%～60%	60%～70%	70%～80%	80%～90%	90%～100%
k_i	0.8031	0.5090	0.3226	0.2044	0.1296	0.0822	0.0520	0.0331	0.0208	0.0132
b_i	1.0000	0.8659	0.6959	0.5342	0.3978	0.2898	0.207	0.1468	0.102	0.0705

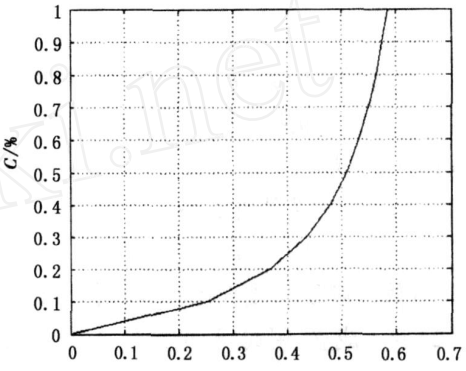


图 3 气体浓度与谐波比值的关系

Fig 3 relation of gas concentration and harmonic ratio

5 结 论

在可调谐激光光谱气体检测中,用简单的线性关系近似朗伯 -比尔定律,在气体浓度较高或气体吸收路径较长时,会产生很大的误差。在不减小气体吸收气室长度的情况下,采用分段线性插值的方法,在不同的范围内采用不同的比例系数,利用气体吸收光谱二次谐波和一次谐波的比值作为系统输出,可以保证系统的检测灵敏度,大大提高系统的检测精度。

参考文献:

[1] 邵杰,高晓明,袁怿谦,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.

[2] Peter Werle, Franz Slemr, Karl Maurer. Near and mid-infrared laser-optical sensor for gas analysis[J]. Opticsand Lasers in Engineering, 2002, 37: 101 - 114.

[3] 李成仁,宋昌烈,李淑凤,等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 144 - 147.

[4] 邓广福,刘光达,田磊,等. 光谱吸收光纤气体传感技术探讨 [J]. 半导体光电, 2006, 27(6): 780 - 783.

[5] T Iseki, H Tai, K Kimura. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser[J]. Meas Sci Technol, 2000, 11: 594 - 602.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net