

光纤气体传感系统背景噪声的滤除

齐 洁^{1,2} 董小鹏² 郑俊达² 林淦斌²

(¹南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

²厦门大学光波技术研究所, 福建 厦门 361005

摘要 在光纤气体传感系统中, 为提高检测的灵敏度, 需要采取措施抑制系统的各类噪声。通过设计低噪声的前置放大器和光源驱动电路可有效地降低系统的噪声; 但对于因光路变化和光在传输过程中偏振态发生变化引起的背景噪声的处理一直是光纤气体传感系统测量灵敏度提高的难点。提出一种基于最小二乘拟合的背景噪声滤除算法。利用参考光栅和法布里-珀罗标准具实现对输出信号的光谱重建。在此基础上, 利用气体特征吸收峰两边的输出拟合整个输出曲线。将系统的输出与拟合曲线相除, 实现系统输出的归一化, 有效地滤除了系统的背景噪声, 避免了当传感系统背景噪声发生变化时, 需要重新采集背景气的繁琐工作, 为测量带来方便。

关键词 光纤光学; 气体检测; 背景噪声; 最小二乘法

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.1105008

An Algorithm of Filtering Background Noise of Optical Fiber Gas Sensor

Qi Jie^{1,2} Dong Xiaopeng² Zheng Junda² Lin Ganbin²

¹*Aeronautic Key Laboratory of Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China*

²*Institute of Lightwave Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*

Abstract In fiber gas sensor systems, in order to improve the detection sensitivity, it is vitally necessary to make intensive efforts to restrain various noises of the system. Designing low-noise preamplifier and light driving circuit can effectively reduce the system noise, but cannot reduce the noise caused by the changes of optical path. This kind of noise is called background noise, which influences the measuring sensitivity of fiber gas sensor system. Therefore, how to filter the background noise affects the improvement of measurement accuracy. This paper puts forward a method based on least logarithm square method which can easily reduce the background noise of optical gas sensor system. By using reference grating and Fabry-Perot etalon, it can reconstruct the output spectra. A modified least square method is used to fit the envelope of gas absorption lines by using the data of absorption peaks on both sides. Dividing the gas absorption lines by the envelope line of absorption lines, the normalization of output is realized and thus the drift of the background noise curve due to the change of experimental environment can be reduced. This method can avoid data collection again when the background noise is drifting, and brings convenience to measurement.

Key words fiber optics; gas detection; background noise; least logarithm square method

OCIS codes 060.2370; 120.0120; 230.0040; 280.1120; 280.4788; 300.1030

1 引 言

差分检测技术是光纤气体传感系统中常见的检

测手段^[1~5]。利用差分检测技术, 理论上可以完全消除光路的干扰因素, 也可以消除光源输出光功率

收稿日期: 2011-05-27; 收到修改稿日期: 2011-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)与厦门大学 985 和 211 工程资助课题。

作者简介: 齐 洁(1974—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: qijie1106@sohu.com

导师简介: 董小鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤技术及其在光通信与光传感领域的应用方面的研究。

E-mail: xpd@xmu.edu.cn(通信联系人)

不稳定的影响,但却无法消除光纤气体传感系统的固有噪声,如光在传输过程中由偏振态的改变引起的噪声,气室、耦合器以及系统中其他光学器件的固有噪声。

对于稳定的测量系统,一般认为背景信号在气体测量过程中保持不变。在测量前,首先通过测量没有待测气体时的信号即零气来作为背景信号,然后在气体测量过程中将背景信号作为固定信号,从输出信号中去除^[6,7]。这种方法简单方便,易于操作,可以有效地去除背景噪声的影响。但是在实际的系统中,除了光学器件本身的固有噪声以外,光源在长时间测量过程中还可能存在一定的温度漂移,系统中的光纤连接线也有可能因机械振动等原因使得背景信号发生改变。为提高测量精度,必须对传感系统中的背景噪声进行滤波处理。本文提出一种基于最小二乘法拟合的背景噪声滤除算法。在输出信号光谱重建的基础上,利用气体特征吸收峰两边的输出拟合整个输出曲线。用该拟合曲线对输出进行归一化处理,可有效滤除背景噪声。

2 光纤乙炔气体差分检测系统

2.1 差分检测原理

在差分吸收技术中,光源发出的光束被分成两路,一路送给气室,经过气室后的光携带被测气体吸收信息,另一路光作为参考信号,与气体的吸收无关。气体的浓度可表示为

$$C = \frac{1}{\alpha(\lambda_1)L} \frac{U(\lambda_2) - U(\lambda_1)}{U(\lambda_2)}, \quad (1)$$

式中 λ_1 对准被测气体的吸收峰,为工作波长; λ_2 波长的光不被气体吸收,为参考波长; $\alpha(\lambda_1)$ 为待测气体在 λ_1 下的吸收系数, L 为传感气室的长度; $U(\lambda_1)$ 和 $U(\lambda_2)$ 是系统在工作波长和参考波长下的光电转换电压。

光源在长时间工作或者环境温度发生改变以及光源驱动电路发生改变时,其输出功率会产生变化。但是由于光源的变化同时作用于气室光路和参考光路,因此光源对两路光信号产生的影响是相同的。利用(1)式求得的气体浓度只与两路信号的光强有关,而与光路的干扰因素无关。因此,差分检测能同时消除光源输出光功率不稳定对输出的影响。

2.2 光纤乙炔差分检测传感系统

本文搭建了以扫描光源为驱动的光纤乙炔差分检测传感系统,系统的结构如图1所示。

用980 nm光源反向抽运一段York公司的低掺铒光纤(长度约为6 m),获得了输出功率为2.9 mW的放大自发辐射(ASE)光源。可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器(MOI公司生产,自由谱宽32.8 nm,3 dB带宽94 pm)通过自带的尾纤与ASE宽带光源耦合,并由锯齿波电路驱动产生中心波长可变的扫描光源。扫描光源通过耦合器1分成两路信号。一路信号经过粗波分复用器(CDWDM)由耦合器2分为传感光(PD1)和参考光(PD2)。另一路信号通过耦合器3经由F-P标准具(PD3)和参考光栅(PD4)。利用参考光栅和光纤耦合的标准具来实现输出信号的光谱重建。对选定波长范围内的PD1路和PD2路的数据进行模/数(A/D)转换,由计算机分别进行平均滤波处理,经差分运算后得到与气体浓度相关的吸收光谱信息。测试在室温下进行。

由于实验条件所限,数据采集卡(NI公司,USB-4431)的采集速率为每通道100 k/s。若锯齿波的扫描速度过快,则会影响系统的分辨率;若扫描速度过慢,则会影响做平均滤波处理的时间。因此,在兼顾扫描系统的分辨率和平均滤波处理时间两方面的因素后,将锯齿波电路的扫描频率设定为58 Hz。

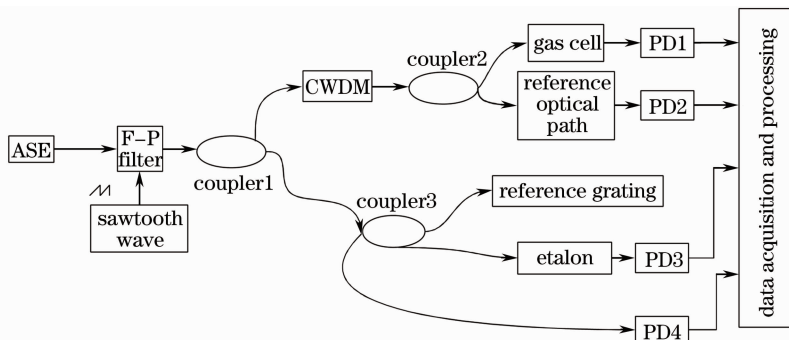


图1 气体传感系统光路

Fig.1 Diagram of the optical fiber gas detection system

3 背景噪声的滤除算法

3.1 光纤气体传感系统中背景噪声的漂移

在整个光纤气体传感系统中,噪声主要由光源驱动电路、前置放大器和光路产生的噪声构成,其中光路产生的噪声由耦合器、气室等光学器件的固有噪声引起。同时,在单模光纤中,双折射效应会引起单模光纤的偏振模色散和 LP_{01} 模的偏振态随传输距离发生变化,双折射效应可能由于光纤纤芯不完全对称、光纤承受了不对称的侧压力、光纤受到弯曲扭转、温度场发生变化以及折射率分布不均匀等因素造成。此外,传感系统在长时间使用过程中,连接头也有可能因振动或者环境的改变引起光耦合效率的改变。这些因素会使输出叠加一个变化的背景噪声。

通过设计低噪声的光源驱动电路、光电转换电路对工频 50 Hz 的干扰信号进行抑制可以消减部分由电路带来的噪声,但是对于由光学器件的固有噪声以及偏振态改变引起的背景噪声的滤除,一直是提高光纤气体传感系统测量精度的难点。系统的输出中会叠加一个很大的背景噪声。

设传感光路光电转换的输出为 $u_1(t)k_1(t)\exp[j\theta_1(t)]$, 参考光路光电转换的输出为 $u_2(t)k_2(t)\exp[j\theta_2(t)]$ 。其中, $u_1(t), u_2(t)$ 分别为传感光路和参考光路在理想情况下光电转换的输出电压; $k_1(t), k_2(t)$ 分别为传感光路和参考光路中因光源波动引起的光强随时间变化的因子; $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$ 分别为两路光信号偏振态等因素改变引起的相移。传感光路和参考光路输出的比值为

$$f(t) = \frac{u_1(t)k_1(t)\exp[j\theta_1(t)]}{u_2(t)k_2(t)\exp[j\theta_2(t)]}. \quad (2)$$

当测量气室没有气体的时候,传感光路和参考光路在理想情况下光电转换的输出 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 的比值应该为一个常数;设 $k_1(t), k_2(t)$ 为常数,那么由(2)式可得,经过差分运算后,系统的输出叠加有一个类似正弦波的背景噪声,如图 2 所示。图 2 为测量气室没有气体时,传感光路和参考光路的输出分别经过平均滤波处理,再相除后系统的输出,纵坐标 u_1/u_2 表示气室光路的光电转换电压与参考光路光电转换电压之比。

由图 2 可看出,随着系统工作时间的推移,背景噪声的谱线会沿着横轴水平移动。这是因为传感光路和参考光路中 $\theta(t)$ 的不同;并且两路信号中光强随时间变化的因子 $k(t)$ 也会有所不同,因此光纤气体传感系统背景噪声的幅值也会发生变化。

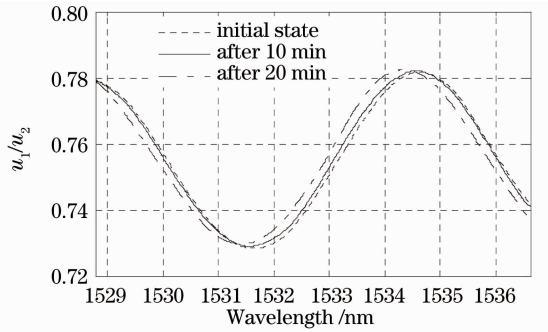


图 2 背景噪声变化示意图

Fig. 2 Change of background noise

3.2 背景噪声滤除算法的实现

由图 2 可以看出,系统内的背景噪声不断发生变化,若采用直接和背景噪声相除来滤波的方法,则需要时时重新测量零气来得到背景信号,这给工业化的实时监测带来难度。

本文提出一种解决背景噪声漂移的方案。由于系统采用的是扫描光源,因此输出信号对应的是一段连续的光谱。首先对输出信号进行光谱重现,然后采用最小二乘法对输出数据进行曲线拟合,得到拟合函数 $P^*(x)$;利用将输出数据与输出数据的拟合曲线相除的办法,来对输出信号做归一化处理,以消除背景噪声。输出信号的光谱重现算法流程如图 3 所示。

根据最小二乘法的定义,拟合函数 $P^*(x)$ 会逼近每次的采样值 y_k [8]。实验中发现,随着气体浓度的增加,吸收峰逐渐加深。因而,由气体的浓度变化引起的 y_k 的变化会影响数据拟合曲线在气体吸收峰位置的形状,使拟合曲线携带有气体的浓度信息。下面以乙炔气体在 1534.099 nm 的吸收峰为例,来说明气体的特性吸收峰对采用最小二乘法拟合线的影响。

为提高系统的分辨率,调整锯齿波的扫描范围,使光源的扫描范围在 1533.500~1535.500 nm,如图 4 所示。图 4 表示不同浓度乙炔气体在 1534.099 nm 附近的吸收峰的数据情况,图中实线、点线和虚线分别表示乙炔气体体积分数分别为 $0, 636 \times 10^{-6}, 955 \times 10^{-6}$ 时用最小二乘法拟合出的输出数据拟合曲线。

由图 4 可以看出,直接用最小二乘法拟合数据所得的曲线,携带有气体浓度的信息,如果将测量得到的数据直接与数据的拟合相除,做输出信号的归一化,所得的结果就会抵消一部分气体浓度的信息,气体的浓度越大,光源的扫描范围越小,采用这种数

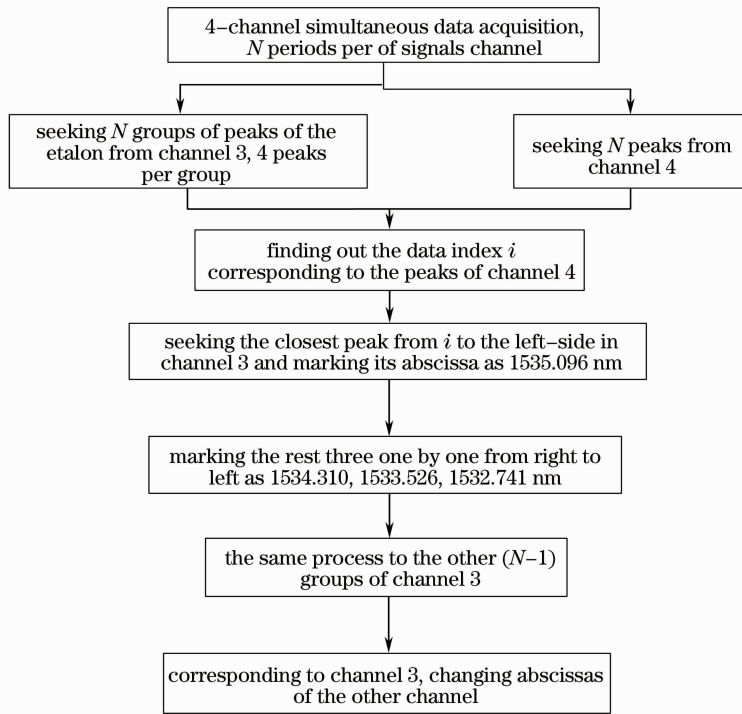


图 3 输出信号光谱重现算法

Fig. 3 Flow chart of spectral reconstruction algorithm

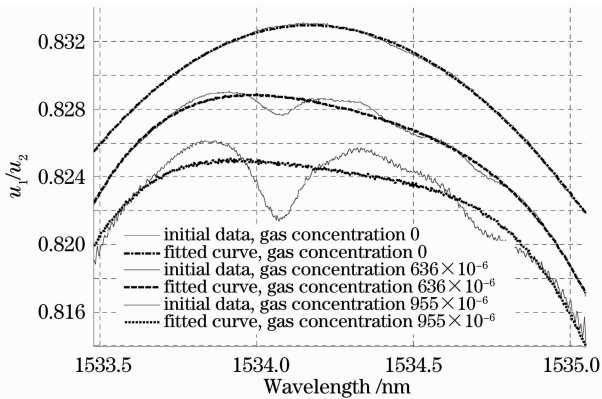


图 4 乙炔气体在 1534.099 nm 吸收峰附近输出数据的曲线拟合图

Fig. 4 Output data fitting curve of acetylene gas absorption peak near 1534.099 nm

据处理方法所带来的误差越大。

为消除由气体浓度对吸收峰附近拟合曲线的影响,提出一种改进的最小二乘拟合办法:由于气体特征吸收峰的位置是由气体分子内部的结构决定的,吸收峰位置的波长固定不变,根据参考光栅和 F-P 标准具提供的波长参考,重现输出信号的光谱信息,利用气体吸收峰两边的数据拟合出整个波段的曲线,对输出数据做归一化处理。设传感气室的输出为

$$u(\lambda) = \begin{cases} f_1(\lambda) & \lambda < \lambda_1 \\ p(\lambda) & \lambda_1 < \lambda < \lambda_2 \\ f_2(\lambda) & \lambda > \lambda_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $p(\lambda)$ 为气体吸收峰谱线对应的函数。若找到一条拟合线,利用气体吸收峰两边的数据即 $\lambda < \lambda_1$, $\lambda > \lambda_2$ 的数据拟合出一个函数 $f(\lambda)$, 则

$$\frac{u(\lambda)}{f(\lambda)} = \begin{cases} \frac{f_1(\lambda)}{f(\lambda)} & \lambda < \lambda_1 \\ \frac{p(\lambda)}{f(\lambda)} & \lambda_1 < \lambda < \lambda_2 \\ \frac{f_2(\lambda)}{f(\lambda)} & \lambda > \lambda_2 \end{cases} \quad (4)$$

由于采用最小二乘法拟合 $f(\lambda)$, 因此 $f_1(\lambda) \approx f(\lambda)$, $f_2(\lambda) \approx f(\lambda)$ 。(4)式可简化为

$$\frac{u(\lambda)}{f(\lambda)} = \begin{cases} 1 & \lambda < \lambda_1 \\ \frac{p(\lambda)}{f(\lambda)} & \lambda_1 < \lambda < \lambda_2 \\ 1 & \lambda > \lambda_2 \end{cases} \quad (5)$$

由(5)式可知, $f(\lambda)$ 会对原始气体的吸收峰产生一定的影响,但由于气体的吸收峰较窄,改进的拟合线在吸收峰位置的数据非常接近零气时系统的输出, $f(\lambda)$ 的影响可以忽略不计。改进的拟合线如图 5 所示。

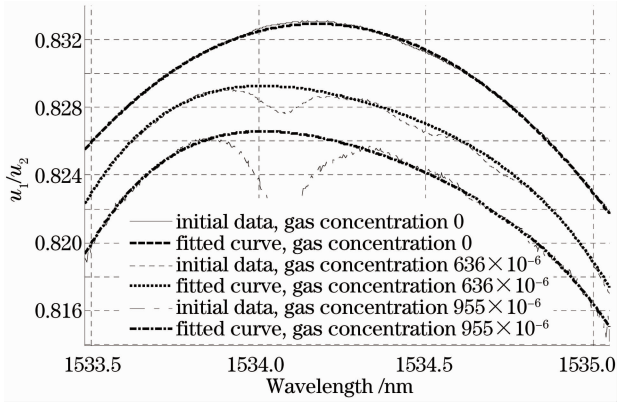


图 5 改进的拟合曲线

Fig. 5 Improved fitting curve

从图 5 可以看出,改进的拟合曲线有效地去除了气体浓度的信息。利用实验所得到的数据和数据的拟合曲线相除,实现输出数据的归一化处理,可以消除背景噪声。

4 实验结果分析

4.1 未去除背景噪声结果

根据差分检测原理,在未去除背景噪声的情况下,根据系统的输出读取乙炔在参考波长 1533.700 nm 下的测量值 u_2 ,在特征吸收峰 1534.099 nm 和 1535.385 nm 的测量值为 u_1 。图 6 为未去除背景噪声时,乙炔在 1534.099 nm 和 1535.385 nm 波长下体积分数与输出的关系曲线。

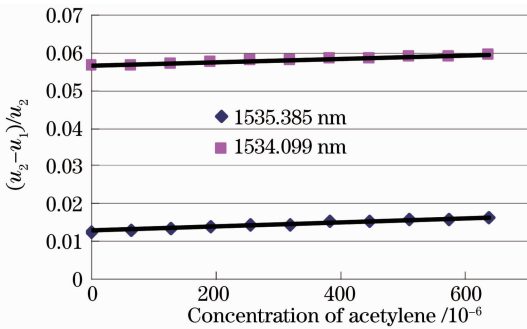


图 6 未去除背景噪声时的输出

Fig. 6 Output of system without removing the background noise

根据 HITRAN 数据库,乙炔在 1534.099 nm 的吸收系数大于 1535.385 nm 的吸收系数。根据(1)式可知,相同浓度的乙炔气体样本,在波长 1534.099 nm 下的输出应该大于波长 1535.385 nm 下的输出。而图 6 显示,系统在未去除背景噪声的时候,乙炔在 1535.385 nm 的输出反而比 1534.099 nm 大,这显然是错误的。产生错误的原

因是由于在测试过程中,背景噪声发生了漂移,因此参考波长下的系统输出 u_2 发生了漂移,从而导致输出结果的错误。

4.2 去除背景噪声结果

图 7 为去除背景噪声后系统对 64×10^{-6} 体积分数的乙炔气体的输出光谱。对图 7 进行分析,可以得到乙炔气体在 1534.099 nm 和 1535.393 nm 波长下浓度与输出的关系曲线,如图 8 所示。

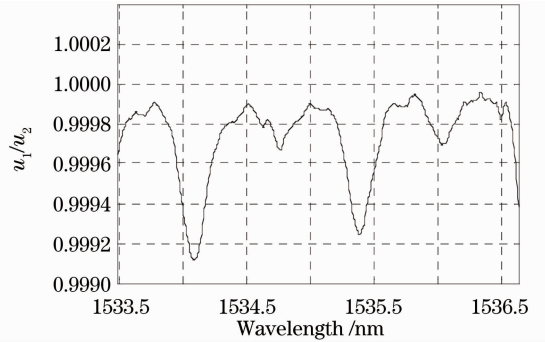


图 7 去除背景噪声后系统的输出光谱

Fig. 7 Output spectrum after filtering the background noise

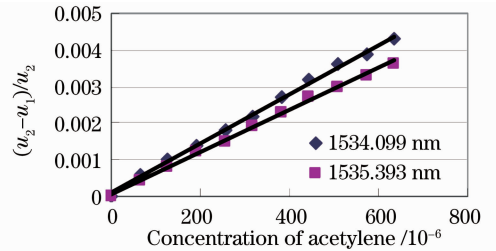


图 8 去除背景噪声后的系统输出

Fig. 8 Output of system after filtering the background noise

由图 8 可以看出,经过背景噪声的滤波算法后,系统在 1534.099 nm 波长下的输出大于 1535.393 nm 下的输出,与理论相吻合。实验中,对每次的采样结果均经过 40 周期平均滤波算法去除随机噪声,然后去除背景噪声。

读取乙炔气体在参考波长 1533.700 nm 的输出作为参考电压 u_2 ,分别读取乙炔气体在 1534.099 nm 的输出 u_1 和 1535.393 nm 的输出 u_0 。对不同波长下乙炔气体测量的定标结果和误差比对见表 1。

由表 1 可看出,去除背景噪声后,测量相对误差总体小于 5.7%。由于气体的浓度由实验室自己配置,因此,测量过程中可能存在着气体扩散的不均匀,从而造成测量误差较大。如果选择不同浓度的标准气体进行定标,则测量误差将会进一步减小。

表 1 乙炔气体在不同波长下测量的定标结果

Table 1 Testing results of acetylene gas in different wavelengths

Actual concentration of acetylene gas / 10^{-6}	Calculated concentration of acetylene gas at 1534.099 nm / 10^{-6}		Calculated concentration of acetylene gas at 1535.393 nm / 10^{-6}		Measurement error at 1534.099 nm / %	Measurement error at 1535.393 nm / %
$(u_2 - u_1) / (u_2 - u_0)$	u_2	u_2				
0	0	0	0	0	0	0
64	0.0006	0.0005	66	60	3.13	4.69
127	0.0010	0.0008	133	120	4.72	5.51
191	0.0014	0.0012	200	200	4.71	4.71
255	0.0018	0.0015	267	260	4.70	1.96
318	0.0021	0.0018	317	320	0.31	0.63
382	0.0026	0.0022	400	400	4.71	4.71
445	0.0030	0.0025	467	460	4.94	3.37
509	0.0033	0.0028	516	520	1.37	2.16
573	0.0037	0.0031	583	580	1.74	1.22
636	0.0038	0.0035	600	660	5.66	3.77

5 结 论

提出了一种基于最小二乘法的背景噪声滤除算法。利用最小二乘法拟合传感气室输出信号的曲线,将传感气室的输出与输出的拟合线相除,去除了系统中因光谱漂移、光源波动、光的偏振态改变产生的背景噪声。实验结果表明,利用此方法可以解决气体检测过程中背景噪声漂移的问题,避免了背景噪声发生漂移后,需要重新采集背景气的繁琐工作,为工业气体的实时监测带来方便。

参 考 文 献

- 1 Wang Yanjiu. Study of Optical Fiber Sensing Technique for Harmful Gas Based on Spectrum Absorption[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007. 37~38
王艳菊. 基于光谱吸收的光纤式有害气体测量技术的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007. 37~38
- 2 Meng Zong. Study on absorption type optical fiber sensor of acetylene[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrumentation*, 2005, **26**(8): 27~28
孟宗. 吸收式光纤乙炔气体传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(8): 27~28
- 3 Ding Hui, Liang Jianqi, Xiong Zhihui. Double FBG system for

acetylene sensing based on differential absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 548~551
丁晖, 梁建奇, 熊志辉. 基于差分光谱吸收技术的双光纤光栅乙炔测量系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 548~551

- 4 Zhang Xiaodong, Li Jun. Optical fiber hydrogen sulfide gas sensor based on spectrum absorption [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, (6): 14~15
张晓东, 李俊. 基于光谱吸收式光纤 H₂S 气体传感器的研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2009, (6): 14~15
- 5 Liu Quan, Lin Haiyan. Study of optical fiber detection system of acetylene gas [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, **22**(4): 15~17
刘泉, 林海燕. 光纤乙炔气体检测系统的研究 [J]. *传感器技术*, 2003, **22**(4): 15~17
- 6 He Ying, Zhang Yujun, Kan Ruifeng *et al.*. The development of acetylene on-line monitoring technology based on laser absorption spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(10): 2228~2231
何莹, 张玉钧, 阚瑞峰等. 基于激光吸收光谱乙炔在线监测技术的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(10): 2228~2231
- 7 Li Ning. Research on Gas Detection and 2D Distribution Reconstruction by Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Technique [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 48~49
李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 48~49
- 8 Chen Changming. Numerical Analysis [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1998. 72
陈昌明. 数值分析 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998. 72

栏目编辑: 谢 婧