

基于数字控制模块的工业有毒气体在线监测仪

张志荣 董凤忠 王煜 庞涛 吴边 涂郭结 夏滑 倪志波 杨阳 徐明明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 以 HF 气体检测为例, 简要介绍了基于数字式控制模块的可调谐半导体激光吸收光谱学方法的工业气体分析技术。为了降低噪声干扰对系统监测的影响, 针对工业现场环境, 设计完成了集数字信号发生器, 数字锁相放大器和数据采集卡与预处理等多重功能的数字式控制模块, 替代了先前系统所采用的模拟单板结构和系统转接板等孤立单元。同时, 为了降低系统因环境温度变化和其它干扰等因素带来的中心吸收波长漂移对最小二乘法应用的影响, 采用信号相关方法实时锁定与调整激光器输出波长在待测气体吸收线中心位置, 完成对浓度的实时计算。测试结果证明采用数字控制模块和数字处理方法在系统体积、成本以及灵敏度、稳定性和降低信号畸变等方面都对仪器的整体性能有较大的改善。

关键词 数字控制模块; 可调谐半导体激光吸收光谱学; 工业废气; 锁相放大器; 信号相关方法

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100304

On-line Monitoring of Industrial Toxic Gases with a Digital-Control Module

Zhang Zhirong Dong Fengzhong Wang Yu Pang Tao Wu Bian
Tu Guojie Xia Hua Ni Zhibo Yang Yang Xu Mingming

(Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract An online gas analyzer with taking HF gas detection as an example based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technique is presented. In order to eliminate or at least reduce the measurement uncertainty and gain high reliability, a close-circle digital-control module (D-CM) with functions of digital signal generator, digital lock-in-amplifier, data acquisition and data preprocessing have been developed to substitute the multi-independent analog boards in our previous system. Meanwhile, the signal correlation method is used to lock the absorption wavelength to reduce the effects of the ambient temperature and other factors. Utilizing the digital-control module and the digital signal processing techniques in the field tests, the sensitivity and stability of the TDLAS system have been greatly improved. Furthermore, smaller volume, lower cost and weaker signal distortion are achieved.

Key words digital-control module; tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS); industrial flue gases; digital lock-in-amplifier; signal-correlation method

OCIS codes 010.1120; 070.6720; 300.6380

1 引言

过去一段时间里, 可调谐二极管激光吸收光谱技术(TOLAS)在大气痕量气体监测、工矿废气排放

监测、机动车尾气和管道安全监测等方面已得到广泛的应用^[1~7]。在大多数情况下, 有毒气体的体积分数都在 10^{-6} 甚至 10^{-9} 量级, 对其实时监测相对困

收稿日期: 2010-08-02; **收到修改稿日期**: 2010-10-27

基金项目: 国家 863 计划(2007AA06Z420)资助课题。

作者简介: 张志荣(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事环境光学监测新技术方面的研究。E-mail: zhangzr@aiofm.ac.cn

导师简介: 董凤忠(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事开发新的环境光学技术用于工业过程控制、节能减排和工业气体的快速在线高灵敏监测等方面的研究。E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn (通信联系人, 中国光学学会会员号: S040111633)

难。因此,结合数字式控制模块,长光程吸收池技术,数字滤波技术以及信号相关锁线处理等技术提高系统的监测灵敏度和系统稳定性等是非常关键和必要的。

由于计算机软件编写相对容易,修改方便,移植简单等优点可以广泛地应用于信号的采样,处理和电路设备的控制和调谐激光器吸收线的锁定等众多方面,因此进一步发展数字处理技术在 TDLAS 系统中的应用可以有效提高系统的性能。针对 TDLAS 系统特定的工业现场使用环境,设计完成了集数字信号发生器、数字锁相放大器和数据采集处理等功能的 16 bit 数字式控制模块。本文以 1.330 μm 波长附近的氟化氢气体监测为例简要介绍了系统的组成、数字控制模块的设计和应用以及信号相关方法的使用,结果证明了基于数字控制模块的工业有毒气体检测仪相较于模拟系统,其性能有较大幅度的提升,因此可以更好地应用于工业环境实时气体检测。

2 系统介绍

2.1 系统设计和基本理论

TDLAS 系统简图如图 1 所示。数字模块提供频率为 10 Hz 的锯齿波和 10 kHz 正弦波调制信号。为了提高系统的灵敏度,利用自行设计加工的新型多次反射吸收池进行测试,长程池具体参数可以参考文献[8]。经过多次反射池内目标气体吸收后的光经探测器转换为电流信号直接输入到数字控制模块进行数据的解调和初级信号平均,输出的 2 byte 16 bit 谐波信号数据通过计算机的 RS232 串口或 USB 接口进行数据的采集,对采集到的谐波信号进行信号的归一化运算来消除光强波动,以及采用信号相关方法来消除波长漂移带来的影响。

遵循朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律的可调谐

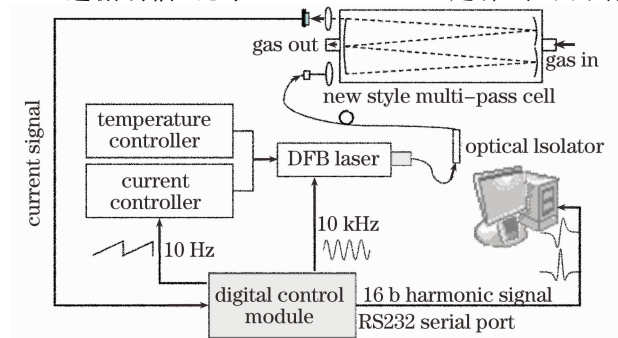


图 1 在线 TDLAS 实验系统设置

Fig. 1 On-line experiment apparatus for TDLAS system

信号探测技术在低浓度信号探测中有广泛的应用,在吸收量较小的情况下,其解调后的二次谐波信号(2f)可以采用如下表示^[9]:

$$I_{2f} \propto I_0 R^n \sigma_0 CL, \quad (1)$$

式中 I_0 表示未经过待测气体吸收的初始光强; R 表示多次反射池的镜片反射率; n 表示反射次数; σ_0 为气体的吸收系数; C 和 L 分别为被测气体的浓度和吸收总光程。同时,采用非线性最小二乘法技术对参考信号和待测信号的二次谐波信号进行拟合得到拟合系数 a ,据此对被测气体进行浓度反演,如下式:

$$I_{01} C_{\text{Mea}} L_{01} = a I_{02} C_{\text{Ref}} L_{02}, \quad (2)$$

式中 C_{Mea} 表示环境待测气体未知浓度; C_{Ref} 表示参考池内的已知标准浓度值; I_{01} 和 I_{02} 表示参考信号和测量信号的初始光强; L_{01} 和 L_{02} 表示吸收气体的测量光程和校准光程。由(2)式可得待测气体的浓度值:

$$C_{\text{Mea}} = a I_{02} C_{\text{Ref}} L_{02} / (I_{01} L_{01}). \quad (3)$$

2.2 数字控制模块设计

为了更好地实现系统的性能和结构优化,避免因模拟芯片带来的温度漂移和信号畸变的影响,设计完成了数字控制模块(D-CM)。图 2 所示为设计的数字模块的主要组件(包括:数字锁相部分,TDLAS 系统控制部分,数据交换接口部分等)和功能部分(包括:原始信号的初步处理,锯齿、正弦信号模拟输出,串口数字数据和模拟数据的输出等);图 3 所示为板块中主要部件锁相放大器的基本原理示意图,包括振荡器,两个放大器和两个低通滤波部分。锁相放大技术主要采用的是外差式振荡方法,它把被测量的信号通过频率变换的方式转变成为直流,即利用锁相放大器中的信号相关原理,对两个混有噪声的周期信号进行相乘和积分处理后,将信号从噪声中检测出来,并达到通过互相关运算削弱噪声影响的目的。与模拟板相同数字板同样有电压和电流两种信号输入方式,在进行痕量气体检测中发现使用电流工作方式比电压方式更加稳定,因此采用电流工作方式;同时为了简便起见,频率为 Ω_{ref} 的参考信号同样由板内控制部件产生。外部包含噪声的信号进入数字控制板,最终通过低通滤波器,而高频部分的干扰被忽略。通过串口输出的 X 路 Y 路谐波信号可以如下表示:

$$X_{2f} = \frac{V_{\text{sig}}}{2} \cos[(\Omega_{\text{sig}} - \Omega_{\text{ref}})n + \theta_{\text{sig}}] + \eta_n$$

$$Y_{2f} = \frac{V_{\text{sig}}}{2} \sin[(\Omega_{\text{sig}} - \Omega_{\text{ref}})n + \theta_{\text{sig}}] + \eta_n, \quad (4)$$

式中 V_{sig} 是幅度相应部分, Ω_{sig} 是频率响应部分, θ_{sig} 是相位响应部分, η_n 是“零”平均附加离散随机过程 (Gaussian 型), 其噪声功率为 σ_n^2 。

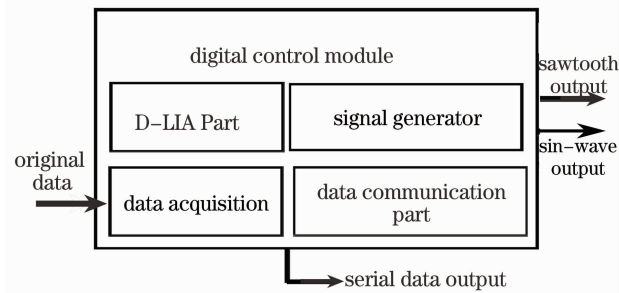


图 2 数控模块组成与功能图

Fig. 2 Components and functions of the D-CM

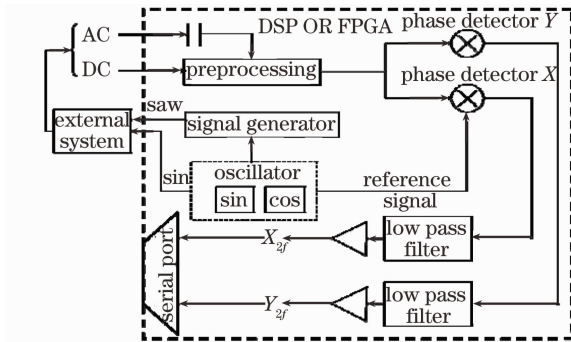


图 3 锁相放大器基本原理图

Fig. 3 Basic principle of the lock-in amplifier

数字控制模块替代了先前系统中信号发生器板, 模拟锁相放大器板, 数据采集卡, 前置放大器板以及转接接口板等的模拟电路板。数字控制模块和单板模拟系统模块外围简图的比较如图 4, 图 5 所示。数字控制模块提供 RS232, RS485, USB 等的接口设置与主机相连接。主机发送控制数据到数字控制模块调整各个参数, 如正弦, 锯齿的频率, 发送时间, 增益, 时间常数, 相位选择, $1f, 2f, 3f, 4f$ 选择等锁相设置参数, 每个采样周期有 1024 个采样点, 每点表示为 16 bit 的数据, 以时间顺序构成一个 2048 byte 数字序列。

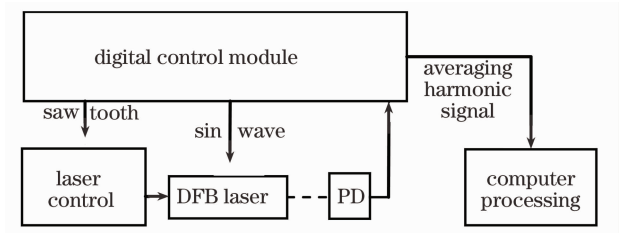


图 4 应用数字模块的系统外围简图

Fig. 4 Digital core control module peripheral diagram

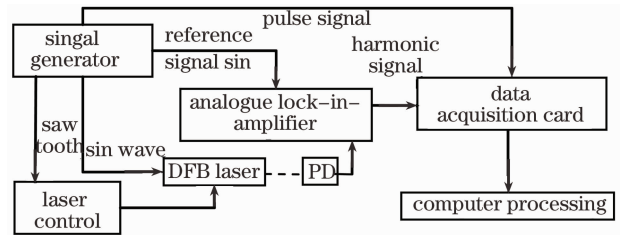


图 5 应用模拟板的系统外围简图

Fig. 5 Analogue lock-in-amplifier peripheral diagram

接收的数据格式如表 1 所示, 前 4 帧帧头为判断依据, 采用状态字“state=?”分别标识读取的步骤与正误。程序初始, 首先设置初始状态字“state=0”, 然后判断存取指针 point 1 和读取指针 point 2 是否相等, 如果相等证明没有数据存储和读入返回程序初始位置 a 处, 如果不相等则证明有数据存储, 读一个字节的的数据判断是否帧头为“12”, 如果为“12”则同步状态字“state+1”, 不为“12”则设置“state=0”重新判断回到程序初始位置 a 处; 当“state=1”时继续判断存取指针 point 1 和读取指针 point 2 是否相等, 如果相等证明没有数据存储和读入返回程序初始位置 a 处, 如果不相等则证明有数据存储, 读一个字节的的数据判断是否帧头为“34”, 如果为“34”则同步状态字“state+1”, 不为“34”则设置“state=0”重新判断回到程序初始位置 a 处; 依此类推, 直到判断“state=4”时, 并且指针数目满足 $(point1 - point2) > 2052$ 或者采样总数满足 $(point1 - point2) > 2052$ 时证明数据存在 1024 点, 读取所有数据并且判断高低字节校验位, 校验通过对数据进行处理和浓度的计算, 不通过或者不大于 2052 (数据读取不全有缺失) 则重新置“state=0”返回继续判断读数计算, 循环往复。

数字模块和模拟板采集在数据的精度和信噪比方面都有了较好的改善。对如图所示低浓度的 HF 气体采用数字模块(图 6 中粗实线所示)和模拟锁相放大器(图 6 中细实线所示)同时采集数据比较。通过峰值、峰谷区域和低电平区域的对比可以得到使用数字模块的信号平滑度有很好的改善, 信噪比也由模拟时 $f_{SNR} = 7$ 提高到 $f_{SNR} = 46$, 同时消除了模拟系统中带来的信号形状的畸变, 因此使用数控模块后系统的监测灵敏度和监测极限得到了相应的提高。

表 1 接收数据格式(HSB:高字节,LSB:低字节)

Table 1 Received data frame format (HSB: high signal tyte, LSB: low signal tyte)

Control buffer					Buffer Number				Data verification	
Content	Frame head				2048 B (1024 points)				HSB	LSB
	12	34	56	78	1 st HSB	1 st LSB	1024 th HSB	1024 th LSB	HSB

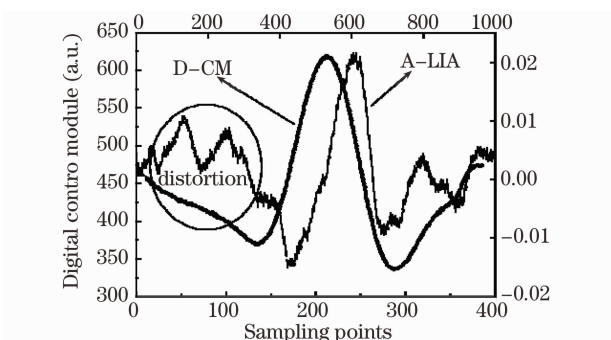


图 6 数字控制板锁相信号与模拟锁相信号采集数据比较

Fig. 6 Comparison of acquisition signals between D-LIA and A-LIA

2.3 信号相关方法

系统测量过程中,会受到可预知的、不可预知的外界干扰影响,比如:电源板引起的中心吸收波长漂移,光学干涉噪声,电子学噪声等因素。针对上述噪声在处理过程中除了采用信号平均,滑动滤波技术消除系统的白噪声以及电子学噪声以外,非线性最小二乘法技术^[10]也是较常用的方法之一,但是非线性最小二乘法的要求就是精确锁定待测气体的吸收线位置,因此就必须抑制波长漂移或锁定吸收位置。P. Werle 等^[11]曾经介绍了一种抑制波长漂移的方法。在此,根据系统的噪声和滤波应用条件,选择了与已知标准信号的相关技术来进行中心吸收线的锁定,并且在处理过程中进行低通滤波消除高频噪声的影响。具体的程序流程如图 7 所示。首先,程序的初始化包括采样点数,最大偏移量 X_{max} ,自相关数组长度,低通滤波设置等参数设定;然后,对采集到的多组标准信号光谱(S)进行数组平均消除白噪声和快速傅里叶变换(FFT),并且对变换后的信号低通滤波处理,保存相应的标准信号的实部(S_r)和虚部(S_i);第三步,采集多组未知浓度气体的光谱信号(M),同样对多组 M 信号进行数据平均,消除信号中的白噪声,对平均后的数组进行 FFT 变换和低通滤波处理,保存得到的实部(M_r)和虚部(M_i)变量;第四步,对得到的两组参数通过复矩阵乘法得到处理后的实部(R_r)虚部(R_i),然后对复矩阵进行逆快速傅里叶变换(I-FFT),得到了两组信号的相关信号;最后,采用峰值寻找函数找寻漂移的位置坐标

X,与设定的最大偏移量 X_{max} 比较,如果超出了设定范围,将信号反馈给激光器进行调整和标准信号的重新采集,如果没有超过最大偏移量,根据得到的偏移坐标调整测量信号位置,精确对准标准信号进行非线性最小二乘法处理,反演得到浓度值。

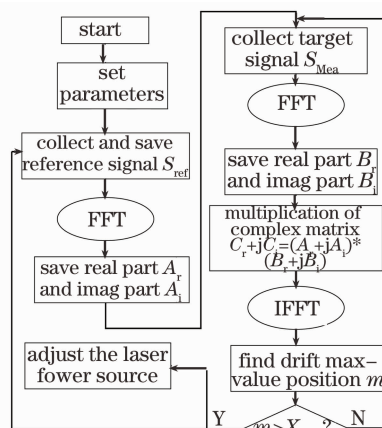


图 7 信号相关技术流程图

Fig. 7 Signal-correlation technique's flow-chart

采用此信号相关技术,对于正在开发的数字式温度和电流控制板有重要的意义,可以实时根据反馈回来的漂移位置,用于调整温控板或者电流板的输出精确锁定吸收波长位置,为浓度的精确计算奠定基础。

3 实验结果分析

为了更好地说明信号相关法锁定吸收线的每一个步骤和作用以及相对于采用三点校准位置锁定吸收线位置的优越性,以体积分数为 300×10^{-9} 的 HF 气体进行实时监测为例,选取标准信号和一组相对于中心吸收波长漂移后的实验数据进行讨论。图 8(a)所示为漂移信号与参考信号,漂移信号相对于参考信号的峰值和坐标位置存在约为 10% 的漂移;测量信号与参考信号的相关图如图 8(b)所示,可以得到测量信号相对于参考信号存在着 90 点的漂移;因此根据漂移点数对所测量信号进行补“零”操作,如图 8(c)所示,调整回原始最小二乘拟合窗口区,提高精确度。但是值得注意的是,在信号补“零”操作时,因为存在着直流信号量因此不能盲目的填补

漂移点数,要根据具体情况分析补值。另外一种传统的方法就是:利用三点算法(谐波信号的最大值,最大值两边的左右最小极值共三点)确定光谱中心波长漂移的点数,但是由于系统不确定噪声的存在对三点校准就会有较大的影响。图(d)是利用三点方法锁定波长计算得到的光谱中心位置偏移量和信

号相关法校准的偏移量比较。可以明显的看出,三点校准法摆动范围很大,摆动可信区域比信号相关法大约 2.28 倍三点法和相关法上的可信区(UWL)分别为 3.135 和 2.653;下可信区(LWL)分别为 7.82和 2.163。有效的证明了信号相关方法比传统的三点校准方法更可靠,可以满足应用的要求。

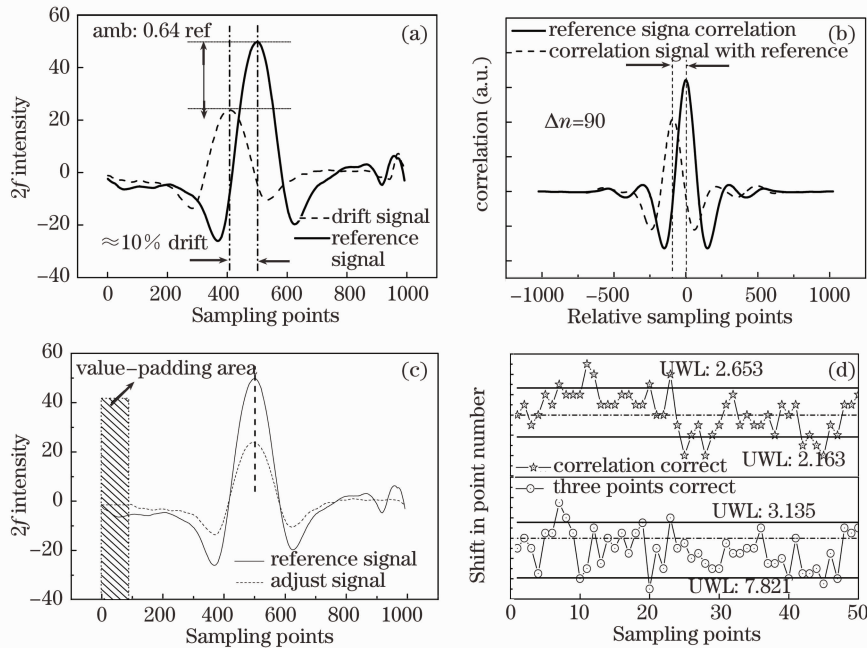


图 8 (a) HF 气体的参考和漂移信号, (b)参考信号和测量信号的相关图, (c)“补零”后的信号, (d)相关法校准和三点方法校准的可信度比较

Fig. 8 (a) Reference signal and drifts signal of HF signals, (b) Correlation graph between reference and measured signal, (c) Corrected signal and value-padding, (d) Comparison between correlation and three-point correct

值得注意的是,在现有的实验情况下,因为波长不超出采样区间的小的偏移,即图中的 0 到 1000 点之间可以采用此方法校准吸收波长,调整中心波长位置。但是一旦波长漂移出了窗口区,信号相关方法就不能起到精确锁定吸收波长的效果了,只能靠手动调整温度板上的调温电阻。但是,结合信号相关方法利用数控自动校准温控电控板就可以有效锁定中心吸收波长,在任何情况下都不会漂移出窗口采样区。

制板或者外界环境因素所带来的波长漂移、强度起伏等因素的影响,利用多种数字技术比如:信号平均,信号平滑等消除白噪声,信号归一化消除强度变化和信号相关方法精确锁定吸收波长等。实验结果证实,以上方法不仅优化了系统的结构,而且极大地改善了系统的信噪比,稳定性,灵敏度和降低了模拟系统所带来的信号畸变,可以方便地集成于工业有毒气体实时在线监测仪中。

4 结 论

介绍了设计的数字控制模块替代先前模拟系统的信号发生板,模拟锁相放大器板,数据采集卡,前置放大板和系统转接板等的单板模拟模块,同时数字板内部产生正弦参考信号用于数据信号的解调得到 1024 点(2 byte 16 bit)一次,二次谐波信号用于信号的光强消除,不仅集成了系统的众多功能,而且极大的简化了系统的体积。为了解决温度、电流控

参 考 文 献

- 1 M. Lackner. Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in the process industries-a review[J]. *Rev. Chem. Eng.*, 2007, **23**(2): 65~147
- 2 P. A. Martin. Near-infrared diode laser spectroscopy in chemical process and environmental air monitoring[J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2002, **31**(4): 201~210
- 3 Dong Fengzhong, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. On-line roadside vehicle emissions monitoring (Part 1)[J]. *J. Test And Measurement Technology*, 2005, **19**(2): 119~127
董凤忠, 刘文清, 刘建国 等. 机动车尾汽的道边在线实时监测(上)[J]. *测试技术学报*, 2005, **19**(2): 119~127
- 4 Dong Fengzhong, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. On-line

- roadside vehicle emissions monitoring (Part 2)[J]. *J. Test And Measurement Technology*, 2005, **19**(3): 237~244
- 董凤忠, 刘文清, 刘建国 等. 机动车尾气的道边在线实时监测(下)[J]. *测试技术学报*, 2005, **19**(3): 119~127
- 5 R. T. Wainner, B. D. Green, M. G. Allen *et al.*. Handheld, battery-powered near-IR TDL sensor for stand-off detection of gas and vapor plumes[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(2~3): 249~254
- 6 T. Iseki, H. Tai, K. Kimura. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**: 594~602
- 7 Zhang Zhirong, Dong Fengzhong, Xia Hua *et al.*. High sensitive monitoring of carbon monoxide in industry flue gases using tunable diode lasers[C]. *SPIE*, 2009, **7382**: 73823~2
- 8 Xia Hua, Dong Fengzhong, Tu Guojie *et al.*. High sensitive detection of carbon monoxide based on novel multi-pass cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2596~2601
- 夏 滑, 董凤忠, 涂郭结 等. 基于新型长光程多次反射池的 CO 高灵敏度检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2596~2601
- 9 J. Reid, D. Labrie. Second harmonic detection with tunable diode laser: comparison of experiment and theory[J]. *Appl. Phys. B*, 1981, **26**(3): 203~210
- 10 Zhang Zhirong, Dong Fengzhong, Tu Guojie *et al.*. Selection of digital filtering techniques in trace gas concentration detection with a tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(11): 1672~1676
- 张志荣, 董凤忠, 涂郭结 等. 可调谐激光痕量气体检测中的数字滤波技术的优选[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(11): 1672~1676
- 11 P. Werle, R. Mucke, F. Slemr. The limits of signal averaging in atmospheric trace-gas monitoring by tunable diode-laser absorption spectroscopy (TDLAS)[J]. *Appl. Phys. B*, 1993, **57**(2): 131~139