

文章编号:1001-5078(2025)03-0368-06

· 激光应用技术 ·

使用 TDLAS 系统的低浓度 CO 检测

王国水,张超峰,栗佩康,裴彦军,李彬,朱旺旺,赵明阳
(中国船舶集团有限公司第七一八研究所,河北邯郸 056027)

摘要:目前基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,已经可以实现许多种类气体浓度的高精度检测。但在实际的工程应用和仪器的批量生产当中,囿于一些激光器本身性能以及检测仪器体积的限制(无法使用更大的反射池),以及环境因素的影响,给低浓度气体分辨造成困难或者使检测精度受到影响。为改善这一问题,本文将主要介绍一种采用固定波门和差值的计算方法,来实现对低浓度的一氧化碳有效分辨,并在不同的温度条件下,对低浓度一氧化碳进行实测。检测结果表明,在恒定的温度条件下,检测 10.01 ppm 的 CO 的误差为 2.2%,在 12 °C 的温差范围内,检测最大误差为 -1.72 ppm。在不同的环境条件下,采用这种处理方式,能够有效地进行低浓度一氧化碳检测,测试结果能够满足工程实际使用需求,一定程度上抵消器件性能造成的影响。在批量较大或器件存在较大个体差异时,本文对于仪器研制设计和生产制造具有积极作用。

关键词:TDLAS; 一氧化碳检测; 浓度反演; FPGA

中图分类号:TN249; TP274 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.007

Low-concentration CO detection using the TDLAS system

WANG Guo-shui, ZHANG Chao-feng, LI Pei-kang, PEI Yan-jun, LI Bin,
ZHU Wang-wang, ZHAO Ming-yang
(Purification Equipment Research Institute of CSSC, Handan 056027, China)

Abstract: At present, high-precision detection of the concentration of many types of gases can be achieved based on the tunable semiconductor laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology. However, in actual engineering applications and mass production of instruments, the performance of some lasers themselves and the limitations of the volume of the detection instrument (larger reflector cells cannot be used), as well as the influence of environmental factors, make it difficult to distinguish low-concentration gases or affect the detection accuracy. To improve this problem, a calculation method using a fixed wave gate and a difference is mainly introduced to achieve effective resolution of low-concentration carbon monoxide, and low-concentration carbon monoxide are measured under different temperature conditions. The test results show that the error of detecting 10.01 ppm CO is 2.2% under constant temperature conditions, and the maximum detection error is -1.72 ppm within the temperature difference range of 12 °C. Under different environmental conditions, the processing method is able to effectively carry out the detection of low-concentration carbon monoxide, and the test results can satisfy the requirements of the actual use of the project, offsetting the impact of device performance to a certain extent. This paper has a positive effect on instrument development, design and production when the batch is large or there are individual differences in the devices.

Keywords: TDLAS; carbon monoxide detection; concentration inversion; FPGA

1 引言

可调谐半导体激光吸收光谱 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS) 技术是一种新兴的检测技术,可以用于 CO、NH₃、NO、H₂O 等许多种类气体的参数检测^[1-3]。区别于传统的化学类传感器,它具有损耗低、环境适应性好、检测精度高、非接触、实时性好、可多种组分同时测量等优点^[4-5],因此逐渐成为一种实用的检测手段,广泛应用于工业生产过程分析、大气环境监测、污染排放控制等领域^[6-7]。

目前 TDLAS 技术主要有两种测试方法,分别是直接吸收光谱 (Direct Absorption Spectroscopy, DAS) 和波长调制光谱 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)^[8-9]。本文将介绍一种基于波长调制方式的 CO 浓度检测系统,该系统以现场可编程逻辑门阵列 (FPGA, Field Programmable Gate Array) 芯片为信号发生、数据处理的核心,利用 MSP430 单片机进行操作的逻辑处理和其他外设的控制。在工程实践以及检测仪器的批量生产当中,会面临许多实际的问题。例如由于仪器整体体积的限制,可能无法使用体积更大的反射池,因此光程受到限制。在大批量使用激光器时,激光器的个体间存在差异,可能存在性能良莠不齐的情况。此外,还有检测仪器的使用环境可能也会对设备造成影响^[10-11]。

以上种种原因可能导致仪器的测试精度受到干扰,尤其是在气体浓度较低的情况下。因此本文将主要说明一种利用固定波门以及差值进行浓度计算的方法,来一定程度上抵消各种因素对低浓度 CO 检测造成的不利影响。同时,在不同的温度条件下,使用检测系统实测 10 ppm 的 CO 气体以说明这种改进方法的效果。

2 检测系统构建及工程中的实际问题

本文所述的 CO 气体检测系统主要基于 WMS 方式,其基本系统框图如图 1 所示。

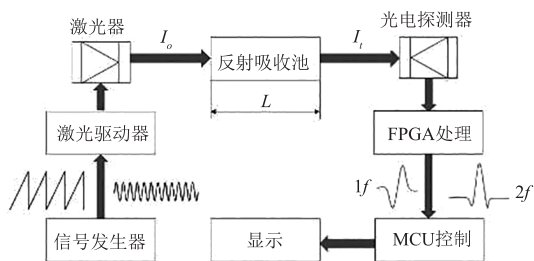


图 1 TDLAS 检测系统框图

Fig. 1 TDLAS detection system block diagram

如图 1 中所示,由 FPGA 芯片生成一组低频锯齿波信号和正弦波信号,两种信号相叠加发送给激光器电流驱动模块,后者则产生相应的调谐电流。通过温控模块使激光器内部稳定在一定温度下,然后在电流的调谐下,激光器发出的激光波长会在目标气体吸收的中心波段附近进行周期性的扫描。激光经激光器发出后,在反射池中经过多次反射,若反射池中有目标气体,则从反射池中射出的激光光强会发生明显变化。从反射池中射出的激光照射到光电探测器上,光信号转化为电信号,其信号经过放大后再发送到 FPGA 芯片进行解调,经过与正交的倍频信号相乘和低通滤波后,得到对应倍频的谐波分量。谐波分量的平方和再开方即得到不同倍频的谐波信号。在其他环境条件相同的情况下,理论上二次谐波的峰值与气体的浓度应当成正比^[12-13]。

藉此,通过最小二乘法可以标定峰值-浓度曲线,这样测得气体对应的峰值时即可计算出对应的浓度值。

根据前文所述,我们需要通过温度控制模块给蝶型封装的激光器一个电压,则激光器通过 TEC 使自身内部温度恒定,此时再通过电流调谐模块向激光器输入调谐电流,这样激光器则会根据我们的需要输出一定波长的激光。而同批次不同的激光器本身的性质存在区别,即器件存在一定程度的个体差异,在同一个温度 (25 °C) 下测试出的数据结果,其出射激光的中心波长并不尽相同。因此在实际的使用当中,不同的激光器的调制参数也存在差异。接下来说明在工程实际中遇到的问题。一是在参数设置好以后,当环境条件未发生变化时,激光器上电工作后需要一定的时间来稳定状态,对于个别的个体,这段时间可能会略长,因此在其工作稳定前后同一气体最后得到的二次谐波峰值会有差异。

二是当其工作稳定后,受到外界环境的影响,例如温度的变化,最终的得到的信号峰值也会产生变化。而这种环境因素有时又难以避免,例如在整合的整个仪器当中,由于电源等部件发热,而有时又不适合增加散热风扇等部件。

此外,有些个体的调制性能可能并非那么理想,在合适的温度下给予其线性的电流,其出射光的波长变化距理想情况也有差距。

这种变化在气体浓度较高时影响通常较小,而在较低的浓度下可能影响较大而影响到测试精度。而其受到外界环境如温度的影响变化又经常不是单一趋向的,因此想通过测试外界温度值直接进行补偿既需要大量的测试数据,同时又不一定适用于每个个体。

这里以一个性能并不十分优良的激光器为例说明,其受工作环境温度的影响较大。整个测试系统的构成主要包括由光源模块、光检测模块、数据处理模块等部分,其中使用的小型反射池和数据处理板如图 2 所示。

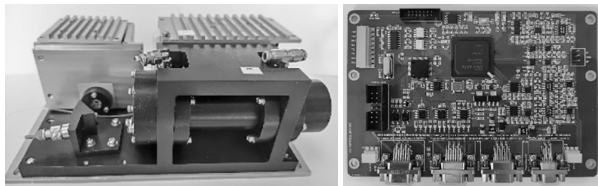


图 2 检测系统的小型反射池和数据处理板
Fig. 2 Small reflection pool and data processing board of the detection system

3 算法的设计实现

针对以上问题,首先简要说明系统的基本算法的设计实现,然后再说明针对以上提出的问题做出的算法改进。

如前文所述,计算功能的实现主要依靠 FPGA,本文选用了 Xilinx 公司 Spartan-6 系列的 Lx75 芯片,软件平台为 ISE14.5,硬件描述语言为 VHDL。基于 DDS(Direct Digital Synthesizer)即直接数字合成器,通过 matlab 生成的 coe 文件和 FPGA 的 DDS 模块,实现任意波形发生器,藉此生成 10 Hz 的锯齿波和 10 kHz 的正弦波,叠加后经由滤波和 DAC 芯片输出模拟电压值,再经由电流驱动模块对激光器进行调谐。光经过反射池后照射到光电探测器上,将光电探测器的电信号放大后经由 ADC 芯片再输入 FPGA 芯片进行处理。其后的处理过程如图 3 所示。

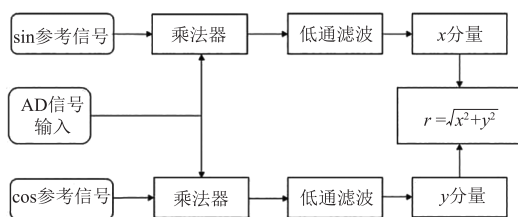


图 3 FPGA 芯片内的信号处理过程
Fig. 3 Signal processing in FPGA chip

由 FPGA 产生对应的倍频且相位相差 $\pi/2$ 正弦信号,然后与 ADC 芯片输入的信号相乘,再经过低通滤波得到对应的谐波信号分量,分量的平方和开方,即为谐波信号值。

为了自动搜寻到二次谐波的信号峰值处,我们基于一次谐波的波形 $drin_1f$,时钟信号 clk_25k 频率为 25 kHz, $drin_1f$ 的波形假定如图 4 时,当其值减小时,更新 $d1f_min$,而在其他情况下, $d1f_min$ 保持不变。这样 $d1f_min$ 不发生变化的区间生成一个波门,为 $wavegate_1f_min$ 。在 $wavegate_1f_min$ 内,再进行 $d1f_max$ 的更新, $drin_1f$ 值增大时,更新 $d1f_max$,其他情况下, $d1f_max$ 保持不变,这样,在 $d1f_max$ 发生更新的时段产生波门 $wavegate_2f$,最后在 $wavegate_2f$ 内查找二次谐波的最大值即可。最终生成的时序图如图 4 所示。

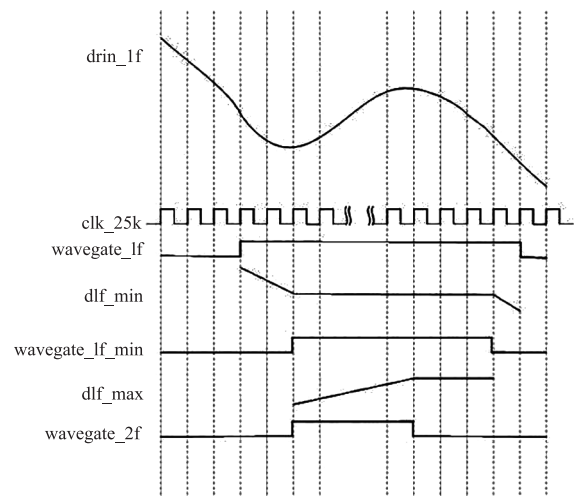


图 4 定位二次谐波峰值的时序图

Fig. 4 Timing diagram for locating the second harmonic peak

这样做的好处在于,可以一定程度抑制噪声和信号漂移。但是当气体浓度较低或者吸收很弱时,以及前文所述问题的情况下,有可能无法触发波门的生成,进而影响对低浓度气体的检测。

接下来说明对于以上问题做出的改进方法。首先我们在大量的实践操作中发现,在激光器的温控以及电流调谐参数都固定后,当激光器工作稳定后,二次谐波在时域当中的位置的变化基本上比较微小,对于工程中的应用基本不会产生影响。锯齿波的频率为 10 Hz,时钟频率为 25 kHz,则一个周期内计数为 2500。选择在计数 801 ~ 1600 间生成一个固定的波门,在此波门内提取二次谐波的峰值。这样避免了因吸收较弱而无法触发波门的问题,但是

同时又产生了一个新的问题,即信号发生较小的漂移也会造成低浓度测量上的问题。因此,在低浓度下对二次谐波的峰值进行差值计算,即在一个周期内于前述的波门两侧,计数为 572 ~ 699 和 1701 ~ 1828 的区间再生成两个波门,取其内各 128 个点的值的均值作为无吸收的信号基底,以中心波门内的峰值扣除两侧无吸收的均值作为浓度计算用的信号值,如图 5 所示。

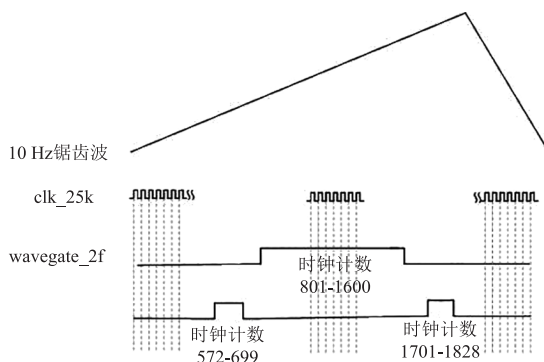


图 5 采用固定波门的时序图

Fig. 5 Timing diagram using fixed gate

最终生成的 FPGA 处理模块的 RTL 层级的电路图如图 6 所示。

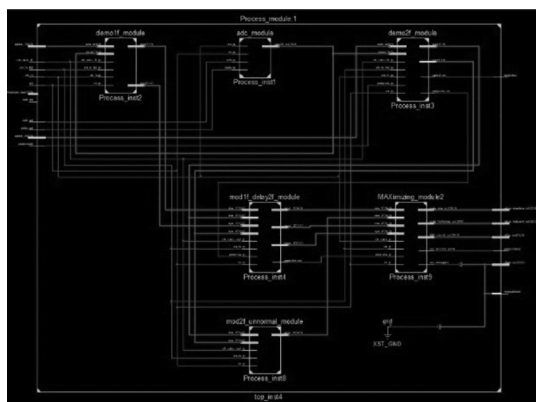


图 6 FPGA 信号处理的 RTL 电路图

Fig. 6 RTL circuit diagram of FPGA signal processing

而当气体浓度较高时,产生的二次谐波的两翼会进入两侧波门的范围内,另外在高浓度下,谐波的峰值受到的影响较小,因此为了过渡平滑,设 A_3 为计算用信号值, A_1 为波门内的信号峰值, A_2 为在两侧波门内采集计算的无吸收的均值。则:

$$A_3 = A_1 - kA_2$$

那么 k 可以根据需要,随着浓度的增加由 1 过渡到 0。最后,以 A_3 来取代原来使用的二次信号峰值,通过 4 个或更多的标定点来拟合一条二次

的信号值 - 浓度曲线,以此实现气体浓度的反演计算。

4 算法验证及变温实验

本文将说明上述算法的实际应用,以及在变温条件下进行低浓度 (10.01 ppm) 的 CO 气体测试。测试系统置于可编程恒温恒湿试验箱中,如图 7 所示。

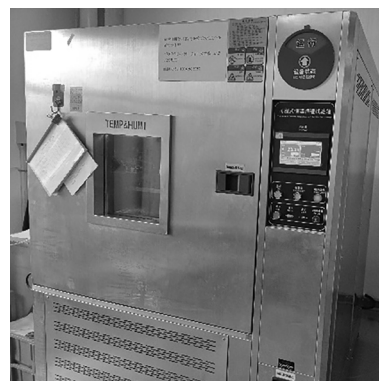
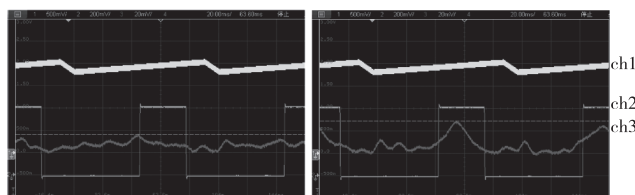


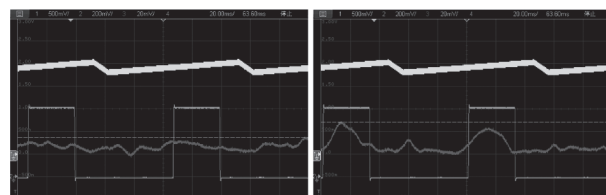
图 7 变温条件下 CO 气体检测测试

Fig. 7 CO gas detection test under variable temperature conditions

接下来说明实验方案。算法程序下载于数据处理主板上,样气使用 10.01 ppm 的 CO 气体,其载气为高纯氮气,流量为 300 ml/min 左右。为实现温度条件的变化,测试系统置于可编程恒温恒湿试验箱中,测试的峰值数据通过数据处理主板外接的显示屏读取,为了更直观地显示结果,使用示波器来显示谐波的图像。温度设置情况为 19 °C、22 °C、25 °C、28 °C、31 °C 五个温度分组,在试验箱中在每个温度设定值到达后停留足够长的时间,分别记录通入氮气以及 10.01 ppm CO 气体后系统得到的二次谐波图像和数值。测试结果如图 8 和表 1 所示。示波器的视图中, ch1 为激光器的驱动电流, ch2 为我们生成的波门, ch3 为二次谐波信号。



(a) 19 °C N₂ and 10.01 ppm CO



(b) 22 °C N₂ and 10.01 ppm CO

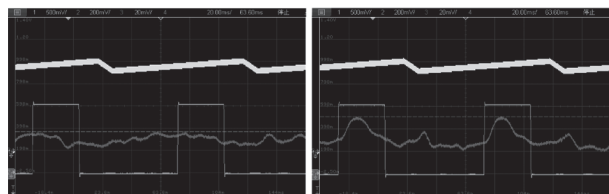
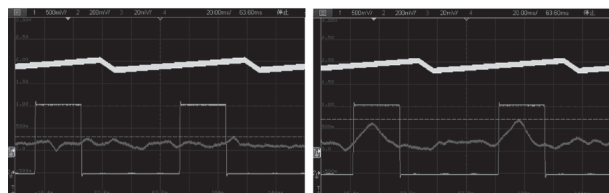
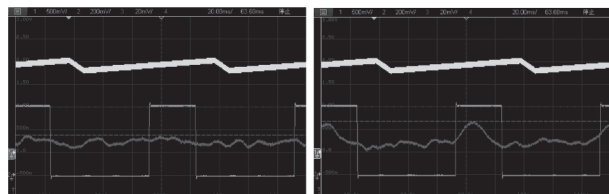
(c) 25 °C N₂ and 10.01 ppm CO(d) 28 °C N₂ and 10.01 ppm CO(e) 31 °C N₂ and 10.01 ppm CO

图 8 不同温度下的二次谐波图像

Fig. 8 Second harmonic generation images at different temperatures

表 1 不同温度及气体浓度的峰值数据

Tab. 1 Peak data at different temperatures and gas concentrations

温度	CO 浓度/ ppm	二次信号 峰值 A_1	无吸收 均值 A_2	差值 A_3
19 °C	0	9350	7619	1731
	10	23055	5602	17453
22 °C	0	10388	7688	2700
	10	20912	6214	14698
25 °C	0	13003	10315	2688
	10	25903	7236	18667
28 °C	0	8361	6659	1702
	10	19911	5707	14204
31 °C	0	11908	9281	2627
	10	22358	7604	14754

从上表的数据中可以看出,随着温度的变化,在同种气体的条件下,二次谐波的峰值也会发生一定的变化,并且随着温度的增加或降低并未呈现出统一的趋向性,这也给通过温度数值进行补偿带来了困难。另一方面,可以看到在反射池中充入氮气,二次谐波的值最高来到了 13003,而充入 10.01 ppm 的 CO,二次谐波的值最低为 19911,其差值仅为 6908,这无疑给标定和分辨低浓度的 CO 气体带来了困难。而经过改进的算法得到的结果,充入氮气时计算值最高为 2700,充入 10.01 ppm 的 CO 气体时计算值最低为 14204,两者相差达到 11504,而氮气中的数值也更接

近于 0,这对于标定和计算都是有好处的,更加显著地将低浓度 CO 气体和氮气的信号区分开来。

接下来,进行峰值-浓度曲线的拟合。首先我们再测得一组向系统内充入 45 ppm、950 ppm 的 CO 气体得到的峰值,其信号图如图 9 所示。

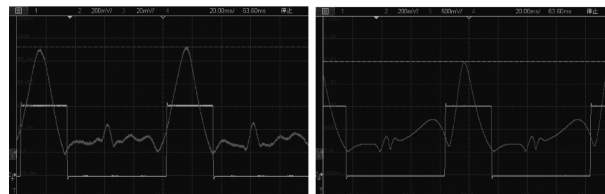


图 9 45 ppm 和 950 ppm 的 CO 气体的二次谐波图像

Fig. 9 Second harmonic generation images of CO gas at 45 ppm and 950 ppm

在 45 ppm 的浓度下,差值 A_3 为 65480,在 950 ppm 的浓度下,由于峰值此时受影响较小,且两侧所占比例太大,所以直接取峰值 A_1 ,为 1292805。为了拟合更加精确,拟合时浓度值乘 100,即若设峰值为 x ,浓度为 y 。那么:

$$y \times 100 = k_1 x^2 + k_2 x + k_3 \quad (2)$$

若以 25 °C 的数值为例,取 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 4.762×10^{-10} 、0.0731、-341.4,则峰值 18667 代入得到浓度约为 10.23 ppm,误差为 2.2%。如综合考虑整个变温过程,则若取 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 6.409×10^{-10} 、0.0722、-197.1,则将前面表格中的差值 A_3 代入,其最大值 18667 和最小值 14204 代入得到的浓度值分别约为 11.51 ppm 和 8.29 ppm,最大误差为 -1.72 ppm。这样,由原本的标定困难到可有效分辨低浓度的 CO,能够满足工程中的使用需求。

5 结论

TDLAS 气体检测系统能够实现多种气体浓度的精确测量,但在实际的工程和生产应用中,往往会面临并非所有器件的性能都十分理想的问题,不同的个体存在差异且有些受到环境因素的影响更为明显,对低浓度的气体分辨造成困难或者影响检测精度。

本文为改善以上问题,说明了一种采用固定波门采集二次谐波信号值并进行差值计算的方法,并在不同的温度条件下进行了 10.01 ppm CO 气体的实际测试,测试结果表明在恒定的温度条件下,检测 10.01 ppm 的 CO 的误差为 2.2%,在 12 °C 的温差范围内,检测最大误差为 -1.72 ppm。能够这种方法能够有效进行 CO 气体的分辨,满足工程、生产应用中的实际需求,对于提高器件的利用率、平衡外界

环境变化造成的干扰都有有益的效果。

参考文献:

- [1] Xü Ziyi, Liu Shuo. Research progress of isotope gas detection technology based on mass spectrometry and spectral analysis[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2024, 61(13): 32–43. (in Chinese)
许子怡, 刘硕. 基于质谱和光谱分析的同位素气体检测技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(13): 32–43.
- [2] Liu Shanhu, Wu Yong, Liang Lizhen, et al. Comparison and analysis of gas detection technologies based on TDLAS[J]. *Measurement and Testing Technology*, 2024, 51(4): 35–39. (in Chinese)
柳山虎, 吴勇, 梁立振, 等. 基于 TDLAS 的气体检测技术对比与分析[J]. *计量与测试技术*, 2024, 51(4): 35–39.
- [3] Zhang Xin, Qiu Haifeng, Lan Jiaqi, et al. Design and application of WM-TDLAS gas detection system based on programmable gate array[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2024, 51(4): 79–89. (in Chinese)
张鑫, 邱海峰, 兰嘉琪, 等. 可编程门阵列 WM-TDLAS 气体检测系统设计及应用[J]. *光电工程*, 2024, 51(4): 79–89.
- [4] Guo Songjie, Wang Lupeng, Chen Jinzheng, et al. Application analysis of TDLAS in the simultaneous measurement of multi-component pyrolysis gases from forest fuels[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(3): 625–631. (in Chinese)
郭松杰, 王璐鹏, 陈金铮, 等. TDLAS 在森林可燃物热解气体多组分同步测量中的应用分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(3): 625–631.
- [5] Lingling K, Kai M, Hongwei L, et al. Real-time detection of methane concentration based on TDLAS technology and 1D-WACNN[J/OL]. *Optoelectronics Letters*, 1–8[2024–07–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1370.TN.20240422.1236.002.html>.
- [6] Liu Zaohai, An Xinchun, Tao Zhi, et al. Multi-component trace gas detection system based on MEMS-FPI on-chip spectroscopy chip[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(2): 359–366. (in Chinese)
刘兆海, 安昕辰, 陶冶, 等. 基于 MEMS-FPI 片上光谱芯片的多组分痕量气体检测系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(2): 359–366.
- [7] 李橙橙, 曹旺, 万元, 等. 基于激光吸收光谱的痕量乙炔检测方法[J/OL]. *中国测试*, 1–6[2024–07–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20240104.1614.002.html>. (in Chinese)
- [8] Li Chengcheng, Cao Wang, Wan Yuan, et al. Trace acetylene detection method based on laser absorption spectroscopy[J/OL]. *China Test*, 1–6[2024–07–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20240104.1614.002.html>.
- [9] Xin Wenhui, Ren Zuoyong, Fan Jianxin, et al. Design and implementation of TDLAS-WMS signal control system based on FPGA[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 373–380. (in Chinese)
辛文辉, 任卓勇, 樊建鑫, 等. 基于 FPGA 的 TDLAS-WMS 信号控制系统设计及实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 373–380.
- [10] Wang Ruifeng. Application of tunable diode laser absorption spectroscopy in atmosphere monitoring and combustion diagnosis[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
王瑞峰. 可调谐二极管激光吸收光谱在大气监测及燃烧诊断中的应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [11] Wang Zeyuan, Wei Zhipeng, Sun Lipeng. Design of semiconductor laser temperature control system for TDLAS[J/OL]. *Laser Magazine*, 1–6[2024–07–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20240612.0941.006.html>. (in Chinese)
王泽元, 魏志鹏, 孙礼朋. 用于 TDLAS 的半导体激光器温度控制系统设计[J/OL]. *激光杂志*, 1–6[2024–07–21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20240612.0941.006.html>.
- [12] Wang Yinsong, Xie Ruixin, Kong Qingmei, et al. Modulation parameter optimization and temperature compensation of CO detection system based on TDLAS[J]. *Optical Technology*, 2024, 50(1): 81–87. (in Chinese)
王印松, 谢蕊馨, 孔庆梅, 等. 基于 TDLAS 的 CO 检测系统调制参数优化与温度补偿[J]. *光学技术*, 2024, 50(1): 81–87.
- [13] Huang An. Study on the spectral model and parameter inversion method of combustion flow field in a wide temperature and pressure range[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
黄安. 宽温压范围燃烧流场光谱模型与参数反演方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [14] Cui Ruyue. Development and application of highly sensitive gas sensing technology based on novel folded path optical absorption cell[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023. (in Chinese)
崔茹悦. 基于新型折叠路径光学吸收池的高灵敏气体传感技术发展和应用[D]. 太原: 山西大学, 2023.