

基于积分球气室的光声光谱法气体检测研究

于欣^{1,2}, 李振钢^{1,2}, 刘家祥¹, 方勇华^{1,2*}, 司赶上^{1,2}, 黄文彪^{1,2}¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 光声光谱技术因其灵敏度高、可靠性强、响应速度快等优点,在气体检测方面得到了广泛的应用。积分球气室内壁的高反射率涂层能有效增大光程,所以常被应用于吸收光谱技术中以提高检测灵敏度。在光声光谱气体检测中,以积分球气室作为吸收池,并在球上附加一根铝管作为共振腔,二者构成耦合声学系统。通过仿真与实验得到系统的实际共振频率,以此共振频率调制 LED 光源,气体受激产生光声信号;利用嵌入式技术,采集球上与铝管末端的两个微音器信号,并进行数据处理、分析、上传与显示。使用 NO₂ 气体进行实验,对比实验结果,发现铝管末端的信号值可有效反演出 NO₂ 气体浓度,最低检测浓度(体积分数)为 3×10^{-6} 。

关键词 测量; 光声光谱; 积分球; 耦合声学系统; 嵌入式技术

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1612002

Research on Gas Detection by Photoacoustic Spectroscopy Based on Integrating Sphere Gas Cell

Yu Xin^{1,2}, Li Zhengang^{1,2}, Liu Jiexiang¹, Fang Yonghua^{1,2*}, Si Ganshang^{1,2},
Huang Wenbiao^{1,2}¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Photoacoustic spectroscopy has been widely used in gas detection because of its high sensitivity, strong reliability, and fast response. Because the high-reflectivity coating on the inner walls of integrating spheres can greatly increase the optical path, integrating spheres are often adopted in absorption spectroscopy to improve detection sensitivity. In this paper, an integrating sphere is applied to gas detection by photoacoustic spectroscopy. With the integrating sphere gas cell as the absorption pool, an aluminum tube is attached to the sphere as a resonant cavity to form a coupled acoustic system. The actual resonance frequency of the system is obtained through simulations and experiments. At this frequency, the LED light source is modulated, and the gas is stimulated to generate photoacoustic signals. Embedded technology is integrated to collect the signals of the two microphones on the ball and at the end of the aluminum tube for data processing, analysis, uploading and display. NO₂ gas is employed in the experiments and the experimental results show that the signal values at the end of the aluminum tube can effectively invert the NO₂ gas concentration, and the minimum detection concentration (volume fraction) is 3×10^{-6} .

Key words measurement; photoacoustic spectroscopy; integrating sphere; coupled acoustic system; embedded technology

OCIS codes 120.4570; 110.5125; 280.4788

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-01-16; 录用日期: 2021-03-11

通信作者: *yhfang@aiofm.ac.cn

1 引言

虽然痕量气体在大气环境中的浓度极低,但其对人类生活的影响巨大。例如,空气中硫氧化物和氮氧化物的大量增多可能会导致酸雨和光化学烟雾,CO₂、CH₄ 的过量排放会加剧温室效应,这些现象会对生活环境及人类健康造成严重危害^[1-3]。在电力系统中,变压器长期工作或将导致绝缘系统出现分解故障,产生能溶解于油中的特征气体^[4],如 CH₄、CO、C₂H₄ 等。在生物医学领域,通过检测呼出气体中特定的微量气体含量,可以有效判断某些疾病类型^[5-6]。由此可见,痕量气体的实时准确检测对当今社会的众多方面起着愈发重要的作用^[7]。

痕量气体的检测方法形形色色,主要有光谱法和非光谱法。非光谱法例如化学分析方法,检测流程相对较长,工作量较大,对于样品的检测可能会因取样过程遭到破坏。相比之下,光谱法具有灵活采样、快测试速率以及无损检测等优点。随着检测技术的逐渐成熟,光谱法成为一种较为理想可靠的检测方式。而光声光谱法凭借其灵敏度较高、可靠性高、检测范围广、响应实时等优点^[8]得到了众多学者的青睐。例如,2006 年,Huszár 等^[9]将二次谐波检测与波长调制技术相结合,以聚偏氟乙烯(PVDF)为材料设计了一阶共振光声池,对 NH₃ 的测量灵敏度达到了 5×10^{-8} (表示气体体积分数,下同)。2011 年,王巧云等^[10]将光纤激光器与掺饵光纤放大器组合作为光源,采用共振式光声池结构,极大地提高了 C₂H₂ 气体的检测灵敏度。2017 年,Dong 等^[11]设计了一种基于光声光谱法的 NO₂ 气体传感器,以 3.5 W 蓝紫光二极管激光器为激发光源,采用差分谐振器结构作为光声池,最小检测限约为 5.4×10^{-11} (表示气体体积分数,下同)。2018 年,Yin 课题组^[12]利用 10 W 光纤放大近红外二极管激光器研制了一种光声传感系统,用于检测 SF₆ 分解过程中产生的 CO 浓度,灵敏度达到 10^{-9} 量级。

2019 年,张蕾蕾等^[13]以分布式反馈半导体激光器作为激发光源,结合波长调制及二次谐波技术对 H₂S 痕量气体进行石英增强光声光谱技术研究,获得 H₂S 的探测极限为 1.93×10^{-5} 。同年,靳华伟等^[14]利用低功率蓝光二极管激光器和一阶纵向圆柱形共振光声池实现了 NO₂ 的 10^{-9} 级探测。

但是以上研究大多使用造价昂贵的激光器作为激发光源并通过与常见的圆柱形共振光声池配合使用以提高光声检测的灵敏度,因而存在检测装置成本较高且体积庞大的缺点,不利于系统的集成与便携。针对以上问题,本文介绍了一种气体检测装置,该装置选用中心波长为 405 nm 的 LED 作为光源,在传统光声光谱技术的基础上,结合嵌入式技术与计算机数据处理技术,设计并仿真了一种积分球-铝管耦合系统,其中积分球作为吸收池,铝管作为共振腔进行光声信号放大。经实验对比发现,铝管末端的信号值明显强于球中的信号,可以更加准确反演出气体的浓度。

2 基本原理

光声光谱法痕量气体检测是基于光声效应实现的。在特定波长调制光的作用下,密闭气室中的气体分子吸收光能被激发到高能态,然后通过分子间碰撞释放热能。从宏观上来看,气体的温度会升高,如果此时气体体积保持不变,那么温度的升高将会导致压力的增大。因为入射光被周期性调制,所以气体周围会产生与光源同频的周期性压力波^[15],即光声信号。利用高灵敏度的微音器将探测到的声信号转换成电信号,放大后的电信号被锁相放大器提取,最后通过数据处理和浓度反演可以计算出待测气体含量。光声信号的激发和探测过程是一个电、光、热、声的能量转换过程^[16],其基本检测流程如图 1 所示。

由气体运动学定律可知,密闭光声池内产生的声信号满足波动方程

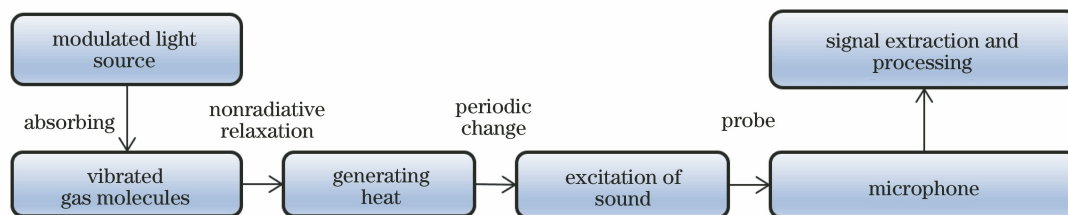


图 1 光声检测流程图

Fig. 1 Flow chart of photoacoustic detection

$$\nabla^2 P - c^{-2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -[c^{-2}(\gamma - 1)] \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: P 是气体的声压; c 是气体中的声速; $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, 表示气体的热容比, 其中 C_p 表示等压热容, C_v 表示等容热容; H 为气体吸收入射光产生的热功率密度, 若入射光光强为 I , 则 $H = \alpha I$, α 为气体分子的吸收系数。由(1)式可计算出光声信号的模式振幅表达式为

$$A_j(\omega) = -\frac{i\omega}{\omega_j^2} \frac{\alpha(\gamma - 1) \int p_j^* I dV}{V_c \left[1 - \frac{\omega^2}{\omega_j^2} - i \left(\frac{\omega}{\omega_j Q_j} \right) \right]}, \quad (2)$$

式中: ω_j 为简正模式 j 下的谐振角频率; V_c 为谐振腔体积; Q_j 为简正模式 j 下的品质因数; p_j^* 为简正模式 j 下的声压的共轭复数。

大量理论证明, 若光声池常数记为 C_{cell} , 则其只与光声池的特性如结构、材料、尺寸等相关。 C 为待测气体的浓度, P_0 为入射光功率, 微音器的灵敏度记为 M_s , 则光声信号 S_{PA} 可表示为

$$S_{PA} = \alpha P_0 C_{cell} M_s C. \quad (3)$$

由(3)式可知, 当 M_s 、 C_{cell} 、 α 和 P_0 一定时, 光声信号幅值与待测气体浓度成正比, 当 M_s 、 C_{cell} 、 α 和 C 一定时, 光声信号幅值随入射光功率的增大而增大。因此可以通过增加入射光功率来提高光声信号的灵敏度, 也可使用光学多程技术, 在气体样品中多次重叠光束, 进而实现灵敏度的提高^[17]。

3 设计与实验

3.1 积分球设计与仿真

增加光功率常用的方法是使用大功率激光器作为光源, 利用叠加光程来达到等效的作用。选择直径为 5.08 cm 的积分球作为光声池, 积分球内壁涂有一层高反射率的聚四氟乙烯材料, 积分球气室结构如图 2 所示。

入射光进入积分球, 经过漫反射实现光束叠加, 光的吸收路径得到增加, 这有利于气体充分吸收光能进而产生足够大的光声信号^[18-20]。球壁上共开 5 个口, 分别是进光口、进气口、出气口以及 2 个光声信号检测口。为了保证检测结果的准确性, 积分球开口总面积小于整个球表面积的 5%, 且开口面积越小, 检测误差越小, 所以每个口的开口直径选择为 3 mm。3D 计算机辅助设计(CAD)示意图如图 3 所示。

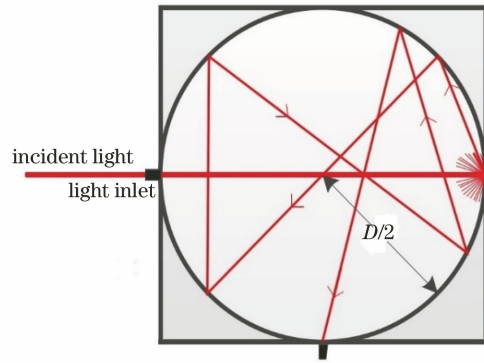


图 2 积分球气室结构图

Fig. 2 Structural diagram of integrating sphere chamber

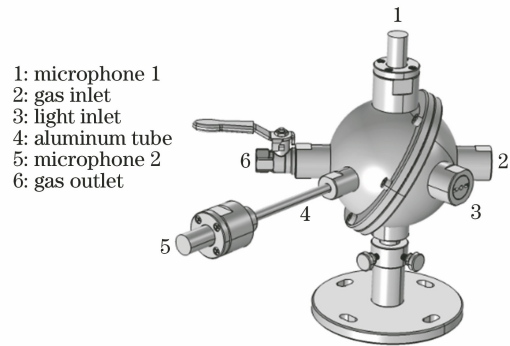


图 3 积分球 3D CAD 示意图

Fig. 3 3D CAD diagram of integrating sphere

积分球等效光程计算公式^[21]为

$$L_{eq} = \frac{2D}{3 \times (1 - \rho)}, \quad (4)$$

式中: D 为积分球直径; ρ 为内置材料的平均反射率。由(4)式可计算出直径为 5.08 cm 的积分球的等效光程约为 3.4 m, 与传统的单通道圆柱形光声池相比, 光程增大了 60 多倍。将光源波长选择为 405 nm, 聚四氟乙烯在该波长处的 ρ 高达 99%。

光声池作为光声检测装置的重要组成部分, 其性能直接影响检测结果的准确性及装置的灵敏度。光声光谱技术中的光声池可分为共振型和非共振型两种。共振型光声池是指光源的调制频率与光声池的声学共振频率一致, 此时, 光声池本身就是一个声学放大器, 光声信号得到初步放大^[22]。共振型光声池系统的共振频率较高, 与非共振光声池相比, 可以有效地降低低频信号的干扰, 有利于信噪比的提高。作为光声池的积分球的内部光场是近似均匀分布的, 不能直接产生共振。为了解决这一问题, 在积分球上附加一根长度为 9 cm、半径为 2 mm 的铝管, 利用铝管的声共振来增强光声信号。使用有限元软件仿真可确定积分球气室共振频率的大小。首先, 构建二维轴对称积分球

的几何模型,定义球半径为 2.54 cm,铝管半径为 2 mm,长度为 9 cm。接着,选择压力声学模块物理场,求解亥姆霍兹方程,获取共振频率。设置球壁为硬声场边界,通过在球壁上施加均匀压力来激发声场。模拟条件是压强为 101.325 kPa、温度为 25 °C、声速为 343 m/s。最后,设置常规化网格,利用频域求解器进行计算,得到积分球频率响应曲线以及声压级仿真结果。频率响应曲线如图 4 所示,声压级仿真结果如图 5 所示。由仿真结果可知,在共振频率处,积分球内的声压接近于 0,而铝管端声压为最大值。

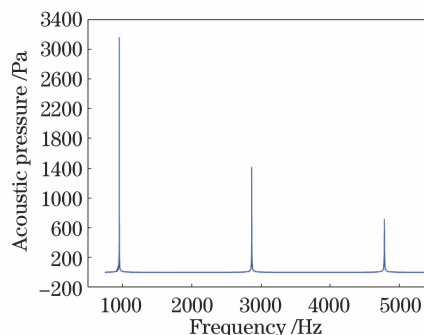


图 4 积分球耦合系统的频率响应曲线

Fig. 4 Frequency response curves of integrating sphere coupling system

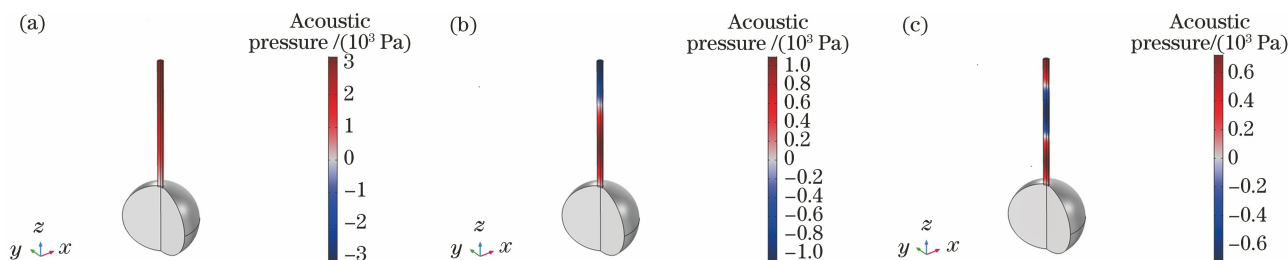


图 5 共振频率处的声压级仿真分布图。(a) 956 Hz; (b) 2868 Hz; (c) 4780 Hz

Fig. 5 Simulated distributions of sound pressure levels at resonant frequencies. (a) 956 Hz; (b) 2868 Hz; (c) 4780 Hz

理论上积分球气室的共振频率越高,系统对电噪声和周围环境的低频噪声的抗干扰能力就越强。但在实际应用中,一般认为共振频率的范围为 1~3 kHz,共振频率过高会造成光声信号衰减太快,不利于信号检测。受积分球开口面积大小、气体中声速大小以及实际加工条件等众多因素的影响,实际共振频率与理论模拟值会有一定偏差,因此,积分球气室的实际共振频率还需通过具体的实验来确定。

3.2 检测系统设计

基于共振光声光谱原理,结合嵌入式技术与计算机技术,设计了一款气体在线检测装置,可实现气体痕量级别的探测。主要功能模块包括:光源、光路准直模块、积分球和铝管构成的耦合积分球气室、信号发生器、配气系统、微音器、锁相放大器、STM32 数据处理系统以及人机交互界面,总体设计方案示意图如图 6 所示。

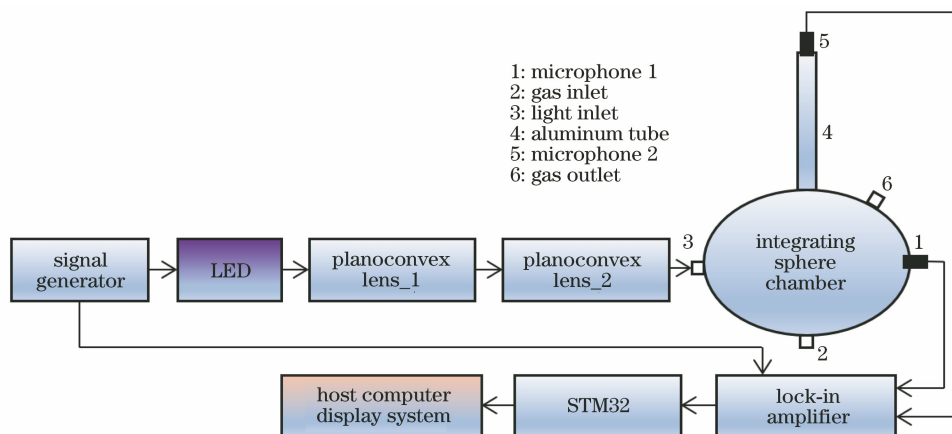


图 6 总体设计方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram of general design scheme

3.2.1 硬件设计

3.2.1.1 光源选择

根据光声光谱检测原理,在一定的波段范围内,

光源的发射光谱应该与待测气体的吸收光谱吻合,且在分子吸收带上,系统光源的光谱不宜变化过大。LED 光源具有使用寿命长、噪声低以及性价比高等

特点,能在室温下长时间稳定工作。综上所述,根据 NO_2 气体的吸收光谱,选择了一款由 Wurth Elektronik 公司生产的中心波长为 405 nm 的 LED 光源作为系统的激发光源,型号为 15335340AA350,光源发射光谱与 NO_2 吸收光谱如图 7 所示,可以看出,二者具有较高的一致性^[23-24]。

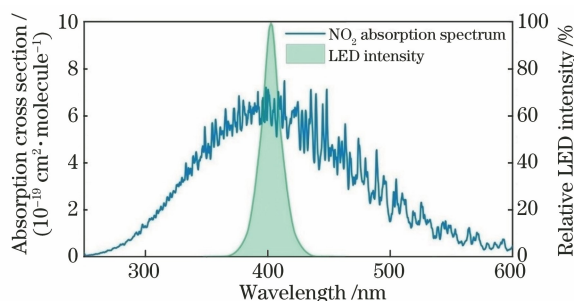


图 7 光源发射光谱与 NO_2 吸收光谱

Fig. 7 Emission spectrum of light source and NO_2 absorption spectrum

3.2.1.2 光声信号采集模块设计

光声信号被微音器采集并通过前置放大器放大后接入锁相放大器的信号输入端,锁相放大器参考端的输入是与调制 LED 光源同频率的信号。设置锁相放大器的放大倍数与积分时间等相关参数,锁相放大器输出放大、滤波后的光声信号电压值,将输出端接入 STM32 开发板进行模数转换,其主芯片内置模拟数字转换器(ADC)功能。

3.2.1.3 STM32 数据处理系统

STM32 数据处理系统功能框图如图 8 所示,通过内置 ADC 采集锁相放大器的输出电压,使用串行外设接口(SPI)方式将后续实验所需的标定系数存储在外部 Flash 存储器件中,可变静态存储器(FSMC)将 ADC 采集结果显示在 LCD 显示屏上,并通过串口(UART)的方式将数据传输至上位机人机交互界面^[25-27]。

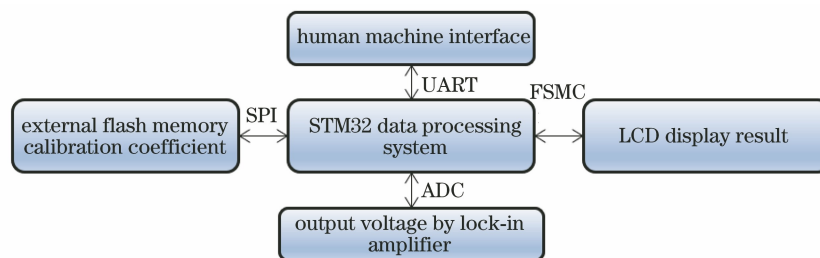


图 8 STM32 数据处理系统功能框图

Fig. 8 Functional block diagram of STM32 data processing system

3.2.2 软件设计

人机交互界面基于 C++ 程序设计语言和 Qt5 软件设计框架,具有以下功能:与 STM32 数据处理系统进行通信,包括数据传输和指令下达;控制 STM32 系统进行浓度标定,得到不同浓度对应的电压值,利用最小二乘法对浓度与电压值进行一元线性回归拟合,得到标定浓度曲线;对 STM32 上传的实测锁相放大值进行反演,得到相应浓度,记录并显示。

3.3 实验方案与结果

3.3.1 光源调制频率的确定

采用积分球耦合系统作为光声池,可以实现声共振,达到信号增强的效果。实际条件与仿真条件不同,受积分球加工误差、球体开孔、球内温度、气体密度和声速等的影响,积分球的实际共振频率与仿真结果有偏差。所以,为了确定积分球实际的共振频率,使用 STM32 产生脉冲宽度调制(PWM)波,通过功率放大器驱动并调制 LED 光源,PWM 波频率范围设定在 700 ~ 2000 Hz,并且 STM32 以

50 Hz 间隔进行粗扫描。首先,向球中充入高纯 N_2 ,STM32 的内置 ADC 采集并记录相应的锁相放大值,记为相应频率的背景噪声。接着,向球中充入以 N_2 为载气的一定浓度的 NO_2 ,采集锁相值,记为包含背景噪声的光声信号。将对应频率的包含背景噪声的光声信号减去背景噪声,便可得到光声信号最大值对应的频率 H 。最后,以 1 Hz 为步长在 $H \pm 50$ Hz 范围内重复上述实验,进行细扫描,得到的最大锁相值对应的频率即为光源调制频率,通过此方法实际测得的共振频率为 820 Hz,频率响应曲线如图 9 所示,其中 all signal 为叠加背景噪声的光声信号,noise 为背景噪声,PA (Photoacoustic) signal 为扣除背景噪声后的光声信号。

3.3.2 背景信号的检测

使用高纯 N_2 对积分球以及气路进行清洗,一般需要 3~5 min,以保证气室内的背景气体为 N_2 ,清洗完成后关闭阀门。将锁相放大器的信号端接入微音器,参考端接入 STM32 输出的 PWM 信号,频率为 820 Hz。STM32 数据处理系统采集锁相放大

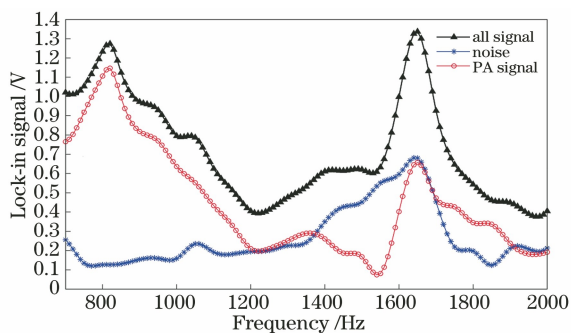


图 9 频率响应曲线

Fig. 9 Frequency response curves

后的信号,即背景信号。

3.3.3 浓度标定

浓度标定流程如图 10 所示。其中, X_n 表示第

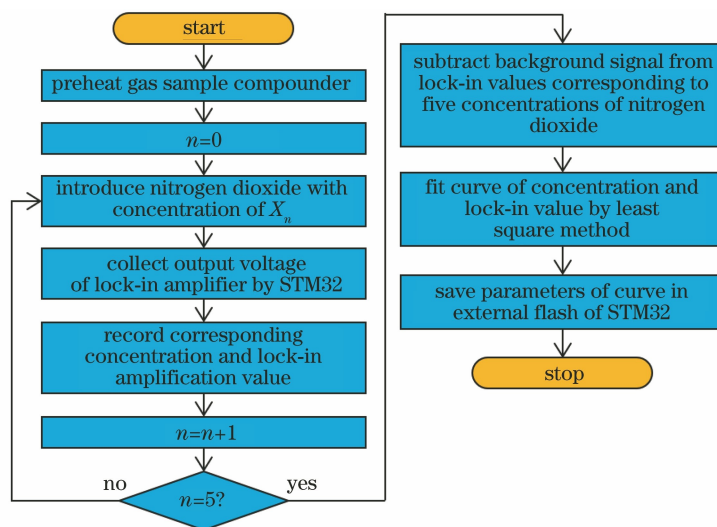


图 10 浓度标定流程图

Fig. 10 Flow chart of concentration calibration

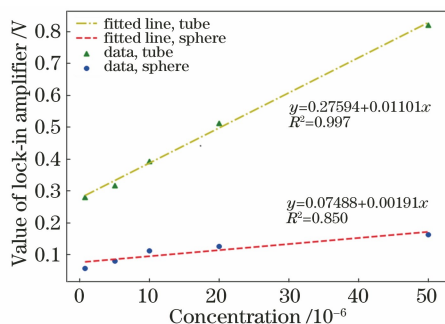


图 11 浓度拟合结果

Fig. 11 Fitted results of concentration

3.3.4 实验结果与分析

为了验证光声检测装置的准确性,配制了 5 种不同浓度的 NO_2 和 N_2 的混合气对系统检测能力进行验证,浓度分别为 3×10^{-6} 、 8×10^{-6} 、 1.6×10^{-5} 、 2×10^{-5} 、 3.5×10^{-5} 。在室温下对混合气体进

n 次配气所得的气体浓度值。采用动态配气仪实现 NO_2 的多浓度配气,浓度(体积分,全文同)分别为 8×10^{-7} 、 5×10^{-6} 、 1×10^{-5} 、 2×10^{-5} 以及 5×10^{-5} 。以 820 Hz 的频率对光源进行调制,将 5 种不同混合气体的锁相放大值减去背景信号,即为光声信号,测得铝管端光声信号对应的电压值分别为 0.280, 0.318, 0.394, 0.513, 0.820 V,利用最小二乘法对所得的电压值与浓度进行一元线性回归拟合。拟合直线的方程为 $y = 0.27594 + 0.01101x$, 决定系数 R^2 达到 0.997。而球上测得的锁相放大值接近于背景信号,光声信号对应的电压值远小于铝管末端,拟合后的决定系数 R^2 为 0.850,结果较差,无法有效反演浓度,结果如图 11 所示。

行了测量,实验时充气时间设为 2 min,充气完毕后先关闭进气阀再关闭出气阀,保持光声池内压强近似为 101.325 kPa。为了减少气体湍流造成的误差,先等待 2 s 后再进行检测,锁相放大器的积分时间设置为 1 s。将相对误差作为衡量标准,其表达式为

$$e = \frac{|C_{\text{PAS}} - C_{\text{real}}|}{C_{\text{real}}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: C_{real} 表示气体的实际浓度值,由高精度的配气仪配制; C_{PAS} 表示光声检测装置检测到的浓度值。通过标定曲线对浓度进行反演,检测结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,搭建的气体检测装置检测到的气体浓度与配气浓度的绝对误差为 $-2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$,相对误差为 $-6\% \sim 6\%$,最低检测极限为 3×10^{-6} ,满足气体在线检测的基本要求。

表 1 气体检测结果

Table 1 Gas detection results

Preparation concentration / 10^{-6}	3	8	16	20	35
Detection concentration / 10^{-6}	3.16	7.58	16.49	20.25	33.83
Absolute error / 10^{-6}	+0.16	-0.42	+0.49	+0.25	-1.17
Relative error /%	+5.33	-5.25	+3.06	+1.25	+3.34

4 结 论

设计了一款基于耦合积分球气室的在线气体检测装置,实现了 NO_2 气体的快速检测。使用积分球作为吸收池,增加了光的吸收路径。在积分球上耦合一根共振铝管,增强了光声信号。结合仿真与实验,确定了 LED 光源的最佳调制频率,配置 5 种不同浓度的 NO_2 气体进行标定,拟合结果表明系统具有很好的线性度。经实验测试,该装置最低检测极限为 3×10^{-6} ,绝对误差为 $-2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$,相对误差为 $-6\% \sim 6\%$ 。结合嵌入式技术与计算机技术,该装置可以实现实时检测与反馈。后续可以通过更换光源检测其他气体。

参 考 文 献

- [1] Zayakhanov A S, Zhamsueva G S, Tsydygov V V, et al. Automated system for monitoring atmospheric pollution [J]. *Measurement Techniques*, 2008, 51 (12): 1342-1346.
- [2] Xu X M, Li B R, Yang B C, et al. Gas measurement system of NO and NO_2 based on photoacoustic spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62 (20): 200704.
许雪梅, 李奔荣, 杨兵初, 等. 基于光声光谱技术的 NO , NO_2 气体分析仪研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62 (20): 200704.
- [3] Zheng H Q. Detection for trace gas concentration based on photoacoustic spectroscopy [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017: 1-8.
郑洪全. 基于光声光谱法的痕量气体浓度检测技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017: 1-8.
- [4] Duval M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers [J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2002, 18(3): 8-17.
- [5] Statheropoulos M, Sianos E, Agapiou A, et al. Preliminary investigation of using volatile organic compounds from human expired air, blood and urine for locating entrapped people in earthquakes [J]. *Journal of Chromatography B*, 2005, 822(1/2): 112-117.
- [6] Wojtas J, Tittel F K, Stacewicz T, et al. Cavity-enhanced absorption spectroscopy and photoacoustic spectroscopy for human breath analysis [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35 (12): 2215-2225.
- [7] Kosterev A A, Tittel F K, Serebryakov D V, et al. Applications of quartz tuning forks in spectroscopic gas sensing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(4): 043105.
- [8] Zhao Y D. The research of novel resonant quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 24-28.
赵彦东. 新型共振石英增强光声光谱技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 24-28.
- [9] Huszár H, Pogány A, Horváth L, et al. Ammonia sensor for agricultural applications using diode laser based on photoacoustic spectroscopy [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2006, 8: 06765.
- [10] Wang Q Y, Wang J W, Li L, et al. An all-optical photoacoustic spectrometer for trace gas detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 153 (1): 214-218.
- [11] Dong L, Yin X K, Zheng H D, et al. Nitrogen Dioxide detection by use of photoacoustic spectroscopy with a high power violet-blue diode laser [C]//CLEO: Science and Innovations 2017, May 14-19, 2017, San Jose, California United States. Washington, D.C.: OSA, 2017: SF2M.7.
- [12] Yin X K, Wu H P, Dong L, et al. Ppb-level photoacoustic sensor system for saturation-free CO detection of SF_6 decomposition by use of a 10 W fiber-amplified near-infrared diode laser [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 282: 567-573.
- [13] Zhang L L, Liu J X, Zhu Z Z, et al. Detection of trace sulfur dioxide gas using quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 213001.
张蕾蕾, 刘家祥, 朱之贞, 等. 基于石英增强光声光谱的 H_2S 痕量气体检测研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 213001.
- [14] Jin H W, Hu R Z, Xie P H, et al. Photo-acoustic technology applied to ppb NO_2 detection by using low power blue diode laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(7): 070703.
靳华伟, 胡仁志, 谢品华, 等. 适用于 ppb 量级 NO_2

- 检测的低功率蓝光二极管光声技术研究[J]. 物理学报, 2019, 68(7): 070703.
- [15] Luo Jing. Research on the detection of SF₆ decomposition products based on non-resonant photoacoustic spectroscopy [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 1-5.
雒静. 基于非共振光声光谱技术的 SF₆ 分解组分检测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 1-5.
- [16] Wang X N, Chen K, Zhou X L, et al. Design and realization of trace gas detection experiment based on photoacoustic spectroscopy [J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(8): 45-48, 56.
王晓娜, 陈珂, 周新磊, 等. 基于光声光谱的微量气体检测实验设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(8): 45-48, 56.
- [17] Saarela J, Sand J, Sorvajärvi T, et al. Transversely excited multipass photoacoustic cell using electromechanical film as microphone[J]. Sensors, 2010, 10(6): 5294-5307.
- [18] Hodgkinson J, Masiyano D, Tatam R P. Using integrating spheres as absorption cells: path-length distribution and application of Beer's law [J]. Applied Optics, 2009, 48(30): 5748-5758.
- [19] Hawe E, Lewis E, Fitzpatrick C. Hazardous gas detection with an integrating sphere in the near-infrared[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2005, 15(1): 250-255.
- [20] Condron T P, Heinisch R P, Lovell D J. Integrating sphere performance in the 0.3 to 8 μm spectral region [J]. Proceedings of SPIE, 1976, 0062: 135-140.
- [21] Du B B, Zhang P, Gao W H, et al. Long optical path gas detection based on MEMS infrared light source [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(4): 977-981.
杜彬彬, 张鹏, 高文宏, 等. 基于微机电系统红外光源的长光程气体检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 977-981.
- [22] Chen K, Yuan S, Gong Z F, et al. Ultra-high sensitive photoacoustic spectrometer for trace gas detection based on fiber-optic acoustic sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328015.
陈珂, 袁帅, 宫振峰, 等. 基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱微量气体检测[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328015.
- [23] Weber C, Kapp J, Schmitt K, et al. Resonant photoacoustic detection of NO₂ with an LED based sensor[J]. Proceedings, 2018, 2(13): 1036-1040.
- [24] Santiago G D, González M G, Peuriot A L, et al. Blue light-emitting diode-based, enhanced resonant excitation of longitudinal acoustic modes in a closed pipe with application to NO₂ [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(2): 023108.
- [25] Lang B H, Cai L Y. Design of multi gas detection system based on STM32 [J]. Computer & Digital Engineering, 2016, 44(3): 552-554, 561.
郎宝华, 蔡莉媛. 基于 STM32 的多气体检测系统设计[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(3): 552-554, 561.
- [26] Tang L F, Yu H S, Wang Z L. System design of fiber optic gas sensor detection based on STM32 microcontroller[J]. Modern Computer, 2019(17): 94-96, 100.
汤龙飞, 于会山, 王宗良. 基于 STM32 单片机光纤传感系统的研究[J]. 现代计算机, 2019(17): 94-96, 100.
- [27] Zhang T. Multi-channel data acquisition based on DMA mechanism of STM32 MCU [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2013(30): 27.
张滔. 基于 STM32 单片机 DMA 机制的多通道数据采集[J]. 黑龙江科技信息, 2013(30): 27.