

基于非分散红外原理的烟气检测系统

于晓曼, 刘文清, 黄书华, 孙友文, 汪世美

- (1. 中国科学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. 安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 提出了一种新型的非分散红外多组份气体分析系统, 利用朗伯比耳定律分析了其工作原理, 讨论了系统硬件和软件的实现方法; 系统采用先进的多次反射池和滤光轮技术, 简化了实验装置并提高了系统检测灵敏度; 通过对不同浓度气体吸光度的测量, 得到气体浓度与吸光度的关系式, 并且以此关系式为依据, 实现了气体浓度反演; 实验表明设计的多组份气体检测系统测量值与标准值相关度均达到 99.9% 以上, 误差在满量程的 2% 范围内, 具有良好的稳定性和可靠性。

关键词: 非分散红外; 多组分; 气体检测

Flue Gas Detection System Based on NDIR Principle

Yu Xiaoman, Liu Wenqing, Huang Shuhua, Sun Youwen, Wang Shimei

- (1. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Key Laboratory of Optical Monitoring Technology for Environment, Hefei 230031, China)

Abstract: A new type of multi-component Non-dispersive infrared gas analysis system was described. Lambert-Beer law was used for analyzing its working principle; the principle and construction (hardware and software) are discussed. Through the introduction of multiple reflection pool and the filter wheel, the experimental apparatus was simplified and the system detection sensitivity was improved. The relationship between gas concentration and the absorption to IR radiation is obtained through measuring the absorbance of different concentration in lab. Then measure the real time concentration according to this relationship. The result proved that the measurement correlation with the standard value reaches above 99.9% and the error is 2%. The system is stable and reliable.

Key words: non-dispersion infrared; multi-component; gas-detection

0 引言

随着工业的发展, 环境污染问题变得愈发严重, 其中大气污染是环境保护所面对的首要问题。作为大气污染气体的主要来源之一, 固定污染源烟气的排放严重影响了人类健康和社会发展^[1]。开发实时化、智能化、稳定可靠、操作简便的污染气体监测系统具有重大意义。

针对国内气体分析仪探测范围小、测量精度不高、分析组份单一等问题, 通过分析研究国内外气体检测方法的现状和发展趋势^[2], 系统采用新型 NDIR 技术实现多组份烟气浓度检测。NDIR 是基于气体红外吸收的原理, 测量过程中探测器不消耗物质, 因此寿命长、稳定性好, 同时还具有选择性好、量程广、精度高, 能够实现多组分污染气体快速和在线连续式检测等优点, 与传统气体检测技术相比有明显的优势。

1 系统光路设计

如图 1 所示, NDIR 光路系统采用滤光轮代替了传统切光器和固定光学滤波器, 滤光轮上由 5 个滤光片构成, 以实现 CO、CO₂ 和 NO₂ 的测量。由于大气环境中通常含有大量的水汽, 其中红外波段具有多个吸收带, 和待测多种气体的吸收

光谱均存在重叠。为了更好地扣除水汽对其它待测气体的干扰, 以提高系统的检测精确度, 系统增加了一个 H₂O 滤光片, 用于检测仪器使用环境中水汽含量。滤光轮在电动机带动下, 以 1500 r/min 速度匀速旋转, 对信号光进行调制, 以消除探测器波动产生的噪声。系统引入了多次反射池结构, 通过 3 个球面镜之间的多次反射增加了吸收光程, 提高了系统检测灵敏度; 采用圆柱形结构的气室, 可减少光线在传输过程中的损耗; 同时当怀特池正常工作时, 利用温度控制器将其恒定在某一温度, 避免水汽冷凝和探测器热噪声对信号产生干扰。

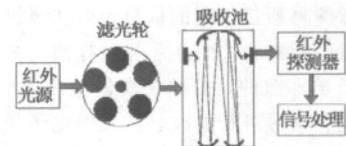


图 1 光路系统

为了方便计算不同浓度下气体的吸光度, 设定如下参量: I_0 表示入射到待测气体的初始光强, I 表示经过待测气体吸收之后的出射光强, L 为光信号在样品池内多次反射后的实际吸收光程, C 表示待测气体的浓度, K 表示待测气体的吸收系数^[3], 由朗伯-比耳定律知:

$$I = I_0 e^{-KCL} \quad (1)$$

定义 A 为气体吸光度, 则

$$A = \ln(I_0(\lambda)/I(\lambda)) = K_s CL \quad (2)$$

吸收定律也适用于那些彼此无相互作用, 且各自服从朗伯-比耳定律的多组份气体, 他们的吸光度具有加合性, 即混合

收稿日期: 2011-05-25; 修回日期: 2011-07-20。

基金项目: 863 重大课题 (2009AA063006); 国家自然科学基金 (No. 4080501) 项目资助。

作者简介: 于晓曼 (1987-), 女, 安徽人, 硕士研究生, 主要从事光电信号检测方面的研究。

气体对某一波长光的吸收等于各个组分对该波长红外光的吸光度总和。

$$A_{\text{总}} = K_1 C_1 L_1 + K_2 C_2 L_2 + \dots + K_n C_n L_n \quad (3)$$

由式 (2) 可以看出, 光路系统抵消了光源不稳定、环境因素变化和探测器灵敏度变化的影响, 减少了误差的来源, 提高了测量的精度。在系统测量一定范围内, 气体浓度值与对应的吸光度成线性, 根据测量的吸光度值可以实现目标气体浓度的反演。

2 系统硬件设计

硬件系统以 MCU 控制单元为核心, 负责控制整个系统的运行, 包括对 AD 的输入控制, 输出数据处理, 光耦同步控制及与 DSP 通讯等, 原理框图见图 2。光耦控制电路, 用于定位数据采集的起始位置, A/D 转换单元将采集的信号转换成数字信号送入 MCU 进行处理, 并将处理后数据通过串口送往 DSP, 进行气体浓度计算, LCD 显示当前气体浓度值。

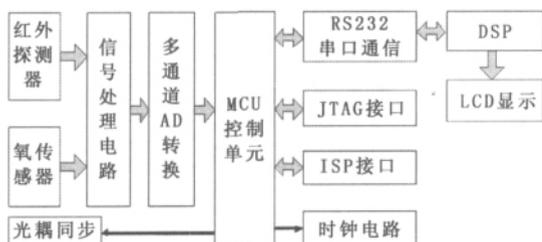


图 2 系统结构框图

系统选用 AVR Atmega128 单片机作为 MCU 控制单元, 它具有先进的 RISC 精简指令集结构, 是 8 位低功耗 CMOS 微处理器。为了得到最大程度的性能以及并行性, AVR 采用了 Harvard 结构, 具有独立的数据和地址总线; 有 64 管脚, 可以与许多外围设备直接相连; 内置 128K 在系统可重复编程 Flash, 4K 字节内部 SRAM; 具有 JTAG 接口, 通过 SPI 口和一般的编程器相连, 可实现对该单片机的 Flash 存储器进行编程。由于其先进的指令集以及单周期指令执行时间, 数据吞吐率高达 1MIPS/MHz, 适于对系统采集到的大量数据进行实时处理。

2.1 红外探测电路设计

由于红外探测器所接收到的信号为微伏量级, 不能满足后续 AD 采样输入信号要求, 而且系统内有抽气泵、同步电机等干扰较强的电子学零部件, 因此探测器输出的信号信噪比低, 需要对探测器输出信号进行滤波、放大等电子学信号处理, 以获得适合采集的待测气体信号值。

为了提高系统的检测精度, 本系统选用 OPA4227 高精度运放作为前置放大电路的运放。OPA4227 具有超低偏置电流,

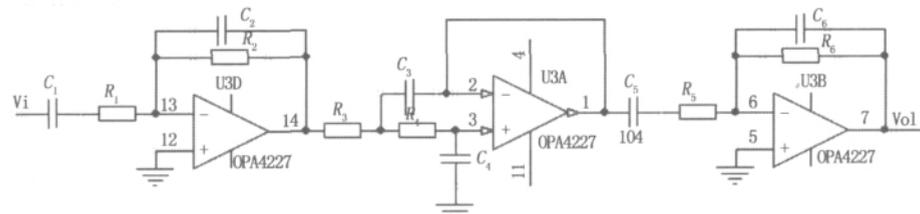


图 3 红外探测器放大电路

低输入失调电压 $<75\mu\text{V}$, 低噪声, 高共模抑制比 138dB, 高开环增益, 宽频带等优点, 非常适合小信号放大, 配合电阻负反馈放大电路精度高、可实时放大特点^[4], 可以很好满足本系统的性能指标, 实现对探测器微弱信号的检测与滤波。

对于第一个和第三个二阶带通滤波器, C_1 、 C_5 起了电平转移和保持的功能。

$$\text{令 } f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \text{ 则}$$

$$A_{V1} = - \frac{R_2}{R_1 (1 - j \frac{f_1}{f}) (1 + j \frac{f}{f_2})} \quad (4)$$

对于第二个二阶低通滤波器, C_3 、 C_4 对于低频信号相当于开路, 低频信号经过 R_3 和 R_4 进入 OPA4227, 经过单倍增益后输出。对于高频信号 C_3 、 C_4 相当于短路, 高频信号在 OPA4227 的输入端即被短路入地, 其中 C_3 是正反馈电容, 它提高了信号的 Q 值。

取 $R_3 = mR_4, R_4 = R, C_3 = nC_4, C_4 = C$ 则

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC \sqrt{mn}} \quad (5)$$

根据放大滤波电路对式 (4) 至式 (5) 进行分析可知, 前级放大滤波电路的通带频率范围是 $300\text{Hz} \sim 1300\text{Hz}$, 而后续 AD 采样信号频率为 450Hz , 该放大器满足设计要求。

2.2 氧传感器电路设计

室内环境中氧气含量过低会给维修人员带来人身安全, 因此需要监测其浓度变化。氧气红外辐射吸收波长峰值为 760nm , 在中红外波段对红外光没有自己的特征吸收带, 不能利用上面 NDIR 法反演氧气浓度值。系统利用 CiTiceL 公司的电化学氧传感器直接测量其浓度值。该氧传感器测量范围为 $0 \sim 100\%$, 系统设计要求的测量范围 $0 \sim 25\%$, 可以满足要求。

氧传感器输出电压范围为 $9 \sim 13\text{mV}$, 为了后续 AD 信号处理, 系统采用 OP07 运放进行 400 倍放大处理, 同时该放大电路可以进行零漂调整, 电路图如图 4 所示。

当氧气浓度从 $0 \sim 25\%$ 变化时, 输出电压值线性从 $1 \sim 4\text{V}$ 变化, 通过线性拟合, 即可反演出待测氧气浓度。

2.3 数据采集模块

A/D 转换单元选用 Maxim 公司的 MAX1132 芯片。MAX1132 是一款 16 位、单/双极性转换的高精度串行逐次逼近型 AD 采样芯片。带有跟踪/保持及校准电路, 宽电压范围 $-12\text{V} \sim 12\text{V}$, 最高采样速率能达到 200ksps ^[5]。系统利用单片机 SPI 接口, 在每个时钟上升沿对数据进行采集, 与 MAX1132 之间进行高速同步数据传输。转换命令启动后, 单片机首先向 MAX1132 写入控制字, 设置 A/D 转换格式, 转换完成后单片机读取转换结果并进行数据处理。为了消除信号毛刺对采集结果造成的影响, 采取多次采集取平均的方式采集数据。

2.4 液晶显示模块

系统采用触摸屏实现人机接口界面显示, 驱动模块为 TI 公司的四线电阻触摸屏转换芯片 TSC2046。通常 TSC2046 工作在中断模式下, 当芯片

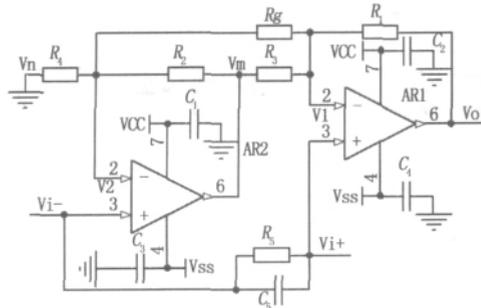


图 4 氧传感器放大电路

检测到有触摸事件时, 向 DSP 发出中断请求, 由 DSP 响应该中断请求, 启动通信过程, 读取 TSC2046 转换结果, 从而获取屏触点坐标, 响应触摸事件。TSC2046 工作时序图见图 5。

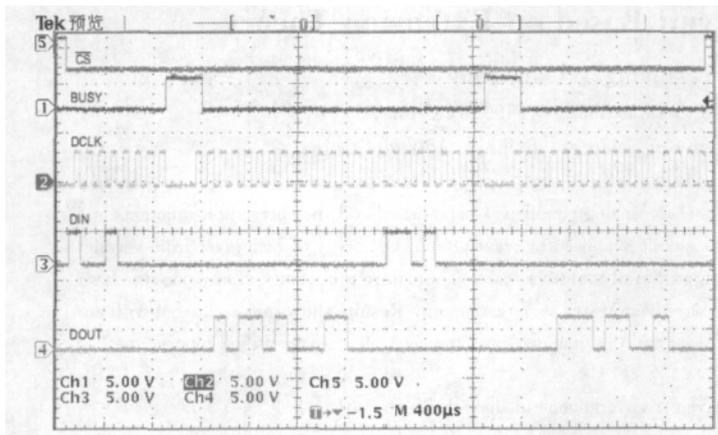


图 5 TSC2046 时序图

3 系统软件设计

软件系统包括单片机控制程序和 DSP 控制程序, 其中单片机控制部分包括: 数据采集和串口通讯等子程序; DSP 控制部分包括: 数据处理, 数据存储、数据显示以及触摸屏中断子程序等。

软件控制程序采用 C 编写。程序首先对单片机、DSP 和外围设备初始化。初始化完成后, DSP 发送命令与单片机进行通讯, 当通讯协议正确后, DSP 等待单片机传送正确数据。当单片机定时器 0 产生比较匹配中断时, 进行数据采集, 并用光耦进行同步, 一旦设定的采集时间 1s 完成后, 单片机发送数据与 DSP 进行通信。单片机和 DSP 通讯时须设定统一的通讯格式, 具体为地址、数据长度、命令、待传送数据和校验码。当单片机接收到一个完整数据包时, 首先判断是否是本机地址, 如果是本机地址, 再进行数据包校验, 最后响应命令。DSP 根据需要发送不同的命令, MCU 根据命令码的种类, 执行相应的功能。软件流程图如图 6 所示。

4 实验

在仪器测量量程内, 利用配气系统配置不同浓度的样气, 通入吸收池中, 连续记录仪器响应。样气的获取是利用已知浓度的国家计量部门检验合格的标准浓度气体, 通过高纯氮对其进行稀释, 在配气系统控制下, 获得要测试的标准气体浓度。图 7~图 9 所示为不同浓度的样气对应的气体吸光度值。

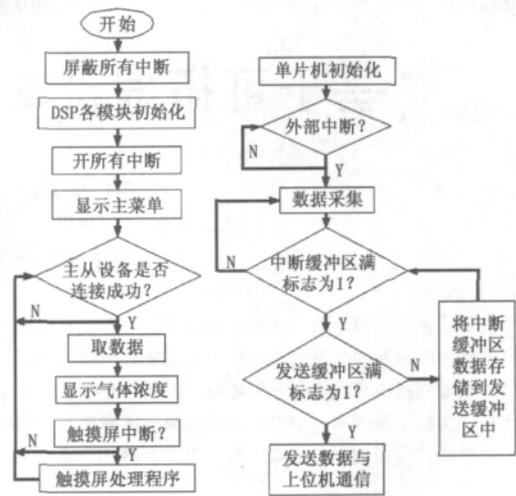


图 6 软件流程图

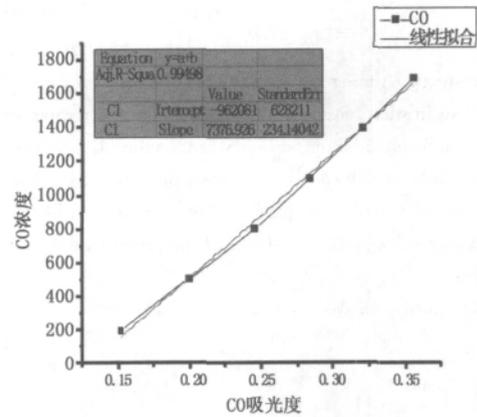


图 7 CO 测量值与标气相关度

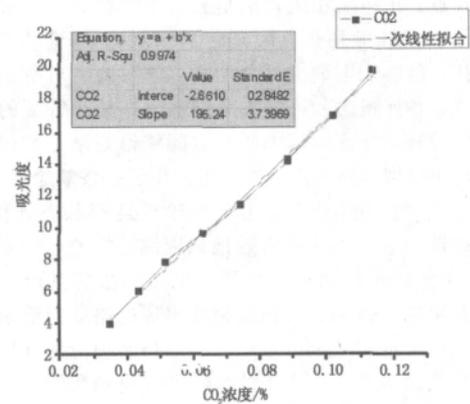


图 8 CO₂ 测量值与标气相关度

根据 7~9 图拟合曲线, 可得到目标气体与气体吸光度之间关系式, 根据该关系式对仪器进行定标, 即可反演出气体浓度值。实验表明, 仪器对 NO₂、CO 和 CO₂ 测量值与标准样气相关度均达到 99.9% 以上, 拟合误差为 2%, 满足仪器设计要求, 具有较高的灵敏度。

(下转 2938 页)

精度^[9]。另外，样本数量太少，生成的规则也就少，系统的学习程度也就低，系统的稳定性肯定不会好。

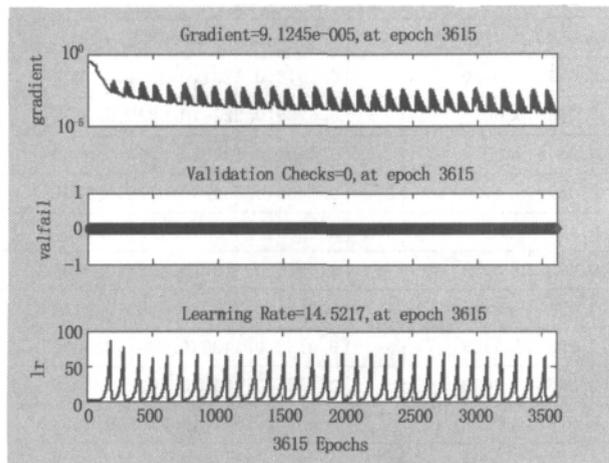


图 9 梯度变化、确认检查曲线和学习率曲线

(2) 模糊区间的划分。理论上，模糊区间划分的越细，系统的精度会越高，但模糊区间划分的越细，隶属函数就越多，系统的学习也就会越复杂，有时是没有必要的。因此，要根据具体情况来合理划分模糊空间，这需要一定的专家知识。

(3) 学习率的大小将直接影响到神经网络的收敛和学习的快慢。这需要在程序调试中找到合适的学习速率因子。

5 结束语

提出了基于神经网络的模糊综合评价方法 FCEANN，以解决在 PATS 安全性评价过程中存在的不确定因素。克服了以往缺乏自学习能力的缺点，摆脱了评价过程中的随机性和评价人员主观上的不确定性及其认识上的模糊性。仿真表明，

FCEANN 方法能够较好地模拟专家评价的全过程，结合知识获取、专家系统和模糊推理功能，能够比较准确地对 PATS 安全性进行评价。

参考文献：

- [1] 刘沐宇, 袁卫国. 基于模糊神经网络的大跨度钢管混凝土拱桥安全性评价方法研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17 (4): 55-58.
- [2] 张东煜, 许化龙. 基于模糊神经网络的导弹故障诊断专家系统 [J]. 计算机测量与控制, 2009, (01): 130-134.
- [3] 邓武, 杨鑫华, 赵慧敏, 等. 粗糙集、神经网络和专家系统模型用于电力系统故障诊断 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (7): 1624-1628.
- [4] Leng G, McGinnity T M, Prasad G. An approach for on-line extraction of fuzzy rules using a self-organising fuzzy neural network [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 150 (2): 211-213.
- [5] Wu S Q, ErM J. Dynamic fuzzy neural networks—A novel approach to function approximation [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2000, 30 (2): 358-364.
- [6] Dagli C, Schierholt K. Stockmarket prediction using different neural network classification architectures [A]. In: IEEE/IAFE 1996 Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering [C]. 1996: 72-78.
- [7] 贾跃, 赵学涛, 林贤杰, 等. 基于 BP 神经网络的鱼雷作战效能模糊综合评估模型及其仿真 [J]. 兵工学报, 2009, 30 (9): 1232-1235.
- [8] 许东, 吴铮. 基于 MATLAB 6. X 的系统分析与设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [9] 薛新华, 张我华, 刘红军. 基于遗传算法和模糊神经网络的边坡稳定性评价 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (12): 2643-2648.

.....

(上接 2907 页)

5 结论

针对国内现有烟气分析仪探测范围小、测量精度不高、分析组份单一等问题，本文介绍了一种新型 NDIR 多组份烟气检测系统。系统采用先进的滤光轮相关和怀特池技术实现对 NO₂、CO 和 CO₂ 同时在线监测。本文详细论述了系统检测原理、软硬件电路设计，实验表明该检测仪运行稳定可靠，测量精度高、范围广，具有广阔的应用前景。

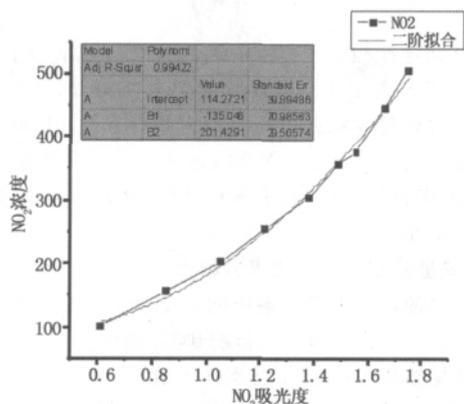


图 9 NO₂ 测量值与标气相关度

参考文献：

- [1] 周涛. 烟气排放紫外差分吸收光谱实时监测方法的研究 [D]. 天津大学, 2008.
- [2] 孙辉. 基于红外吸收法多组份气体分析仪的研制 [D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [3] 刘湖平, 麦云飞, 王静悦. 基于 LabVIEW 和 MSP430 的 CO 气体无线监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 1999-2001.
- [4] 张昱, 孙辉, 戴景民. 新型非分光红外多组份气体分析仪的研制 [J]. 红外技术, 2009, 31 (7): 428-431.
- [5] 郑晓亮, 等. 16 位串行模数转换器 MAX1132 的特性及应用 [J]. 国外电子元器件, 2004, (7): 47-49.
- [6] 孟旭东, 等. 基于 AT89C52 的非分光红外测油仪的研制 [J]. 传感器与仪器仪表, 2008, 24 (10): 227-229.
- [7] 亢凯, 孙振东. 基于单片机的中红外多组份气体检测系统 [J]. 微处理机, 2006, (5): 109-112.
- [8] 万隆. 五组份汽车尾气分析系统设计 [D]. 山东大学, 2008.
- [9] 杨斌. 非分光红外甲烷分析仪的研究与设计 [D]. 太原理工大学, 2007.