中国光学 Chinese Optics 核心期刊

GFC–IFC技术在多组分微量气体分析中的应用

谢耀 华道柱 齐宇 沈婷婷 刘振强 叶华俊 刘维屏

Applications of GFC-IFC in trace multi-component gas analysis

XIE Yao, HUA Dao-zhu, QI Yu, SHEN Ting-ting, LIU Zhen-qiang, YE Hua-jun, LIU Wei-ping

引用本文:
谢耀, 华道柱, 齐宇, 沈婷婷, 刘振强, 叶华俊, 刘维屏. GFC–IFC技术在多组分微量气体分析中的应用[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1378–1386. doi: 10.37188/CO.2021–0064
XIE Yao, HUA Dao-zhu, QI Yu, SHEN Ting-ting, LIU Zhen-qiang, YE Hua-jun, LIU Wei-ping. Applications of GFC-IFC in trace multi-component gas analysis[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1378-1386. doi: 10.37188/CO.2021-0064

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021–0064

文章编号 2095-1531(2021)06-1378-09

GFC-IFC 技术在多组分微量气体分析中的应用

谢 耀[1,2*], 华道柱[1], 齐 宇[1], 沈婷婷[1], 刘振强[1], 叶华俊[1], 刘维屏[2]
(1. 聚光科技(杭州)股份有限公司, 浙江 杭州 310052;
2. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对固定污染源烟气超低排放以及 CO_2 等温室气体迫切的监测需求, 常规的烟气在线监测产品很难满足越来越高的监测标准, 以及多因子同时监测的需求。本文介绍了基于非分散红外原理的多组分微量气体分析系统, 建立气体滤波相关(GFC)和干涉滤波相关(IFC)技术的理论模型, 以建立有效光程、滤光片中心波长和带宽等关键系统参数, 以及待测气体浓度与测量和参考信号的关系, 确定各气体组分所采用的测量技术。构建多组分微量气体分析系统, GFC 和 IFC 相结合的技术, 在时域上实现了参考和检测的双光路设计, 采用长光程的多次回返气体室, 实现小量程和 0.5 mg/m^3 的检出限, 以及不超过±2%F.S.的 24 h 零点和量程漂移, 可同时在线监测 SO_2、NO、NO_2、CO 和 CO_2 等气态污染物, 满足固定污染源超低排放和碳排放的监测需求, 有助于解决固定污染源烟气排放监测数据的真实、准确和全面的问题。

关 键 词: 非分散红外; 气体分析; 多组分; 气体滤波相关; 干涉滤波相关
中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2021-0064

Applications of GFC-IFC in trace multi-component gas analysis

XIE Yao[1,2*], HUA Dao-zhu[1], QI Yu[1], SHEN Ting-ting[1], LIU Zhen-qiang[1], YE Hua-jun[1], LIU Wei-ping[2]
(1. *Focused Photonics (Hangzhou) Inc.*, *Hangzhou* 310052, *China*;
2. *College of Environmental & Resource Sciences*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310012, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *xie_yao*3@163.*com*

Abstract: Ultra-low emission standards of flue gas emitted from stationary sources have been proposed, which creates a new challenge for Continuous Emission Monitoring (CEM). Peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality are frequently-mentioned concepts, which means the monitoring of CO_2 will eventually be necessary. It is difficult to satisfy the strict limits of ultra-low emission standards with conventional CEM systems. A multi-component trace gas analysis system based on non-dispersive infrared is promoted in this paper to monitor trace gases of continuous emission. A Gas Filter Correlation (GFC) model and Interference Filter Correlation (IFC) model were established, which can describe the relationship of optical length, center wavelength, bandwidth of the filters and gas concentration with measure and reference signals. To confirm the measurement technique of gases, the GFC technique combines with the IFC technique to achieve a double-beam path. With the help of white cells, a small-scale, and the detection limit better than 0.5 mg/m^3 can be realized. Zero and span drift are no more than ±2% of the full scale. SO_2, NO, NO_2, CO and CO_2 can

收稿日期: 2021-05-19; **修订日期:** 2021-05-25
基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (No. 2021ZY1028)
Supported by Central Government's Guidance for Local Science and Technology Development Funds (No. 2021ZY1028)

be simultenously and continuously monitored to satisfy the requirements of ultra-low and carbon emission monitoring. This technique is helpful for obtaining factual, accurate and comprehensive CEM data.

Key words: non-dispersive infrared; gas analysis; multi-component; gas filter correlation; interference filter correlation

1　引　言

环境监测数据必须做到“真”、“准”、“全”, 以实现环境监测的真实、准确、可靠, 环境监测专用仪器仪表作为环境监测的载体, 其性能的好坏直接体现环境监测水平的高低。

2019 年 3 月 5 日的政府工作报告中指出: 要持续推进污染防治, 巩固扩大蓝天保卫战成果, 2019 年二氧化硫、氮氧化物排放量要下降 3%; 要壮大绿色环保产业, 加快火电、钢铁行业超低排放改造。相继出台的烟气超低排放标准, 给固定污染源监测仪器仪表开发带来了全新的挑战。超低排放的烟气具有污染物浓度低、湿度大等特点, 对监测仪器的检测精度、稳定性和抗交叉干扰等能力提出了近乎苛刻的要求。

2020 年 9 月 22 日, 在联合国大会上我国明确提出要“提高国家自主贡献力度、采取更有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”, 二氧化碳的在线监测需求已变得十分迫切。

傅立叶红外(Fourier Transform Infrared, FTIR)[1]、可调谐二极管吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)[2-3]、非分散红外(Non-Dispersive Infrared, NDIR)[4-7]吸收光谱技术以及拉曼光谱技术(Raman Spectroscopy, RS)[8-10]是常用的多组分气体分析技术, 其中, FTIR 和 RS 因其价格和运维成本较为昂贵, TDLAS 波长调谐范围有限导致监测组分可扩展性不足, 限制了在超低排放和碳排放监测领域的应用拓展。NDIR 是现行主流的气态污染物分析检测方法之一。其中, 干涉滤波相关[11-13](Interference Filter Correlation, IFC)技术是最为常用的实现方式。

对于气体滤波相关[14](Gas Filter Correlation, GFC)技术, 自 20 世纪 70 年代, NASA 将 GFC 技术引进到气体检测领域以来, 因其强的抗干扰能力和高稳定性逐渐成为 NDIR 气体分析仪的主流技术之一。在国内, GFC 技术的研究起步较晚, 主要聚焦在单气体组分监测技术研究上, 21 世纪初, 中国科学院安徽光学精密机械研究所刘文清团队分别报道了 GFC技术在 CO[15] 和 CH_4[16] 上的应用, 可以实现 143 mg/m^3 的量程和 7.1 μg/m^3 的测量精度。

目前, 采用 GFC 和 IFC 相结合的多组分微量气体分析系统的市场主要被福德世、SICK 和 ESA 等几个国外厂商占据, 国内少有相关产品的报道。

本课题组研制了基于 NDIR 的多组分微量气体分析系统, 采用 GFC 和 IFC 相结合的技术路线, 可实现复杂工况下 SO_2、NO、NO_2、CO、CO_2 等多种气体污染物的同时测量。GFC 和 IFC 相结合, 有利于实现分析系统的小型化和模块化设计。分析系统的性能指标满足烟气超低排放和碳排放的监测需求, 有利于推动基于 GFC-IFC 技术的多组分微量气体分析系统国产化替代和应用拓展, 实现固定污染源监测领域新的技术突破。

2　多组分微量气体分析技术原理

当红外光源发射出的连续光全部通过特定厚度的含有待测气体组分的气体层时, 红外光被吸收, 能量衰减程度与气体浓度、红外光经过待测气体的光程及其吸收系数有关, 服从朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律, 即

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\mathrm{e}^{-K(\lambda)\cdot C\cdot L} \quad , \qquad (1)$$

其中, $I_0(\lambda)$和 $I(\lambda)$ 分别为入射和出射光强, $K(\lambda)$ 为待测气体的吸收截面, C 为待测气体浓度, L 为有效光程。

NDIR 利用非对称双原子分子和多原子分子气体在中红外波段有自己特定吸收带的特性, 实现气态污染物浓度的检测, 吸收特性服从朗伯-比尔定律。

GFC 和 IFC 技术是 NDIR 中最有效的弱信号检测方法。其中, GFC 的测量信号与背景信号属于同一个波段, 如图 1(a)(彩图见期刊电子版)所示, 采用相同的滤光片, 转动 GFC 轮, 光源发出的红外光将依次通过灌有高浓度待测气体和氮气

的气体池（Gas cell 和 N_2 cell）。当通过 Gas cell 时，相应波段的红外光将被高浓度待测气体强烈吸收，经多次回返的长光程气体室（White cell）后不能被探测器探测到，形成一个不受待测气体浓度影响、只反应光源波动以及干扰气体影响的背景信号，从而实现气体滤波的效果，其作为参考信号 R。当红外光通过 N_2 cell 和 White cell 时，该波段的红外光只被 White cell 内的待测气体吸收，在探测器上获得测量信号 M，M 反应了光源波动、干扰气体影响以及待测气体浓度的变化，通过处理 M 和 R 的信号获得待测气体浓度。由于 M 和 R 中均包含干扰气体信息，GFC 原理可以有效降低干扰的影响。

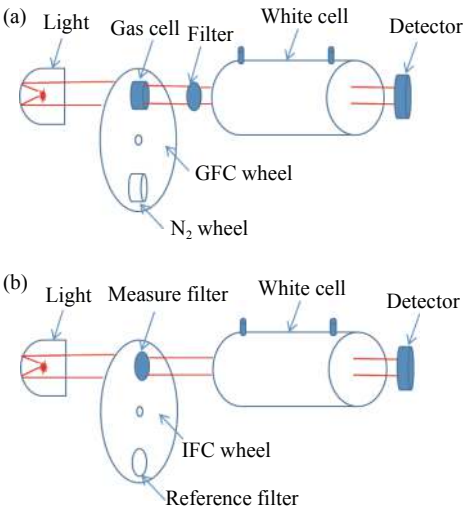

图 1 (a) GFC 和 (b) IFC 的技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) GFC technique and (b) IFC technique

IFC 的测量信号和参考信号采用不同的波段，通过转动 IFC 轮，测量滤光片（Measure filter）和参考滤光片（Reference filter）两个干涉滤光片将光源发出的红外光调制成处于待测气体特征吸收带和偏离吸收带的两束不同波长的光（测量光和参考光），如图 1(b)(彩图见期刊电子版) 所示。当 White cell 中充以待测气体，测量光通过时将被待测气体吸收，探测器的信号反应了光源波动，待测气体吸收和可能存在的干扰气体的影响，该信号作为测量信号 M。当参考光通过时，待测气体对参考光不存在任何吸收，探测器的信号反应了光源波动，作为参考信号 R，此外，参考光的波段选取也要考虑避免其他气体吸收，以形成干净的背景信号。同样，可以从 M 和 R 的偏差中提取气体浓度信息。

3 气体分析技术的模型建立和仿真

为了实现 SO_2、NO、NO_2、CO、CO_2 等多种气体的同时测量，并满足超低排放和碳排放对气态污染物的量程需求，从各组分气体在中红外波段的吸收特性出发，设计理论模型，建立核心参数与测量和参考信号的关系，通过仿真确定各气体组分所采用的测量技术，为系统设计和构建提供理论支撑。

GFC 模型由光源、气体池、滤光片、气体室和探测器组成，IFC 模型由光源、滤光片、气体室和探测器组成，各元件位置关系如图 1 所示。探测器为宽光谱响应的中红外探测器，简便起见，假设探测器在各波段的响应相同，且暂不考虑气体间的交叉干扰。

选用黑体辐射光源，光谱辐射亮度满足：

$$B(\lambda,T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda KT}}-1}\quad , \tag{2}$$

其中 h 为普朗克常数，c 为光速，K 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度，λ 为波长。

碳化硅光源是最常用的黑体辐射光源之一，温度为 1433 K 时，各波长归一化的能量分布如图 2 所示。

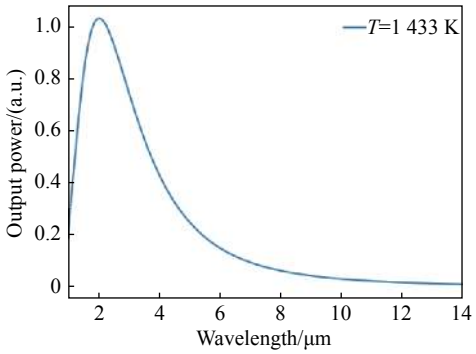

图 2 归一化的黑体辐射能量分布

Fig. 2 Normalized energy distribution of black-body radiation

GFC 模式下，模型的参考信号和测量信号分别表示为：

$$R=\int_{v_1}^{v_2}B(T,\lambda)\cdot\tau_1(v)\cdot\tau_2(v)\cdot\tau_3(v)\mathrm{d}v\quad , \tag{3}$$

$$M=\int_{v_1}^{v_2}B(T,\lambda)\cdot\tau_2(v)\cdot\tau_3(v)\mathrm{d}v\quad , \tag{4}$$

其中, τ_1 为气体池的透过率, τ_2 为气体室的透过率, τ_3 为滤波片的透过率, v_1 和 v_2 分别为滤光片(测量滤光片和参考滤光片相同)的起始和截至频率。根据朗伯-比尔定律, 透过率 τ 可表示为:

$$\tau = \exp\left(-\sigma L C \mathrm{N_A}\right) \quad , \qquad (5)$$

其中 σ 为气体的吸收截面, 单位为 $\mathrm{cm^2/molecular}$, C 为气体浓度, 单位为 $\mathrm{mol/cm^3}$, L 为入射光有效光程, 单位为 cm, $\mathrm{N_A}$ 为阿伏伽德罗常数。

IFC 模式下, 参考信号和测量信号可以分别表示为:

$$R = \int_{v_3}^{v_4} B(T,\lambda)\cdot\tau_2(v)\cdot\tau_3(v)\mathrm{d}v \quad , \qquad (6)$$

$$M = \int_{v_1}^{v_2} B(T,\lambda)\cdot\tau_2(v)\cdot\tau_3(v)\mathrm{d}v \quad , \qquad (7)$$

其中, τ_2 和 τ_3 的定义与式(3)相同, v_1、v_2 和 v_3、v_4 分别为测量和参考滤光片的起始和截至频率。

将式(5)分别代入式(3)和式(4), 以及式(6)和式(7), 可计算出 GFC 和 IFC 模型测量信号 M 和参考信号 R 随待测气体浓度的变化关系。

以 NO 和 $\mathrm{NO_2}$ 为例, 阐述模型的仿真结果。参考 HITRAN 数据库, NO 和 $\mathrm{NO_2}$ 的吸收截面如图 3 所示。

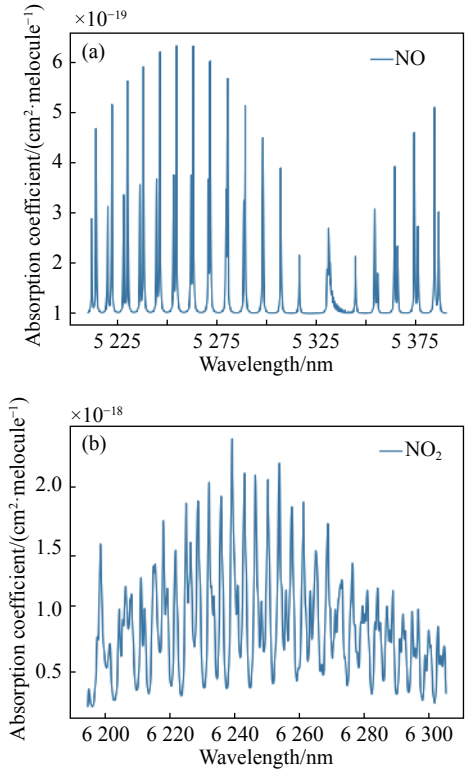

图 3　NO 和 $\mathrm{NO_2}$ 的吸收截面

Fig. 3　Absorption cross sections of NO and $\mathrm{NO_2}$

从图 3 中可以看出, NO 的吸收光谱是基线为零的梳状光谱, 而 $\mathrm{NO_2}$ 的吸收光谱的基线是不为零的包络。

模型中, 参考滤光片的中心波长为 3.95 μm, 带宽为 90 nm; NO 测量滤光片中心波长为 5.3 μm, 带宽为 180 nm; $\mathrm{NO_2}$ 测量滤光片中心波长为 6.3 μm, 带宽为 120 nm; 气体室有效光程为 5 m。GFC 模型中, Gas cell 长度为 1 cm, 待测气体浓度为 100%。考虑到超低排放的监测需求, 系统气态污染物的浓度检测量程需求如表 1 所示。

表 1　分析系统的量程

Tab. 1　Span of multi-component analysis system

气体名称	量程
$\mathrm{SO_2}$/(mg·m⁻³)	0~50
NO/(mg·m⁻³)	0~100
$\mathrm{NO_2}$/(mg·m⁻³)	0~50
CO/(mg·m⁻³)	0~100
$\mathrm{CO_2}$/(%)	25

以测量信号与参考信号强度的比值 M/R 作为纵坐标, 待测气体浓度作为横坐标, 模型的仿真结果如图 4~图 5 所示。

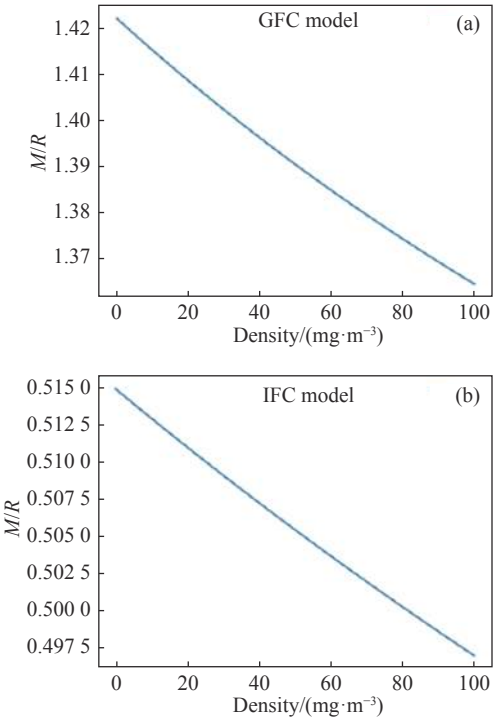

图 4　GFC 和 IFC 模型中, NO 测量信号和参考信号之比随浓度的变化情况

Fig. 4　The ratio of the measurement to the reference signal of NO varying with gas density at GFC model and IFC model

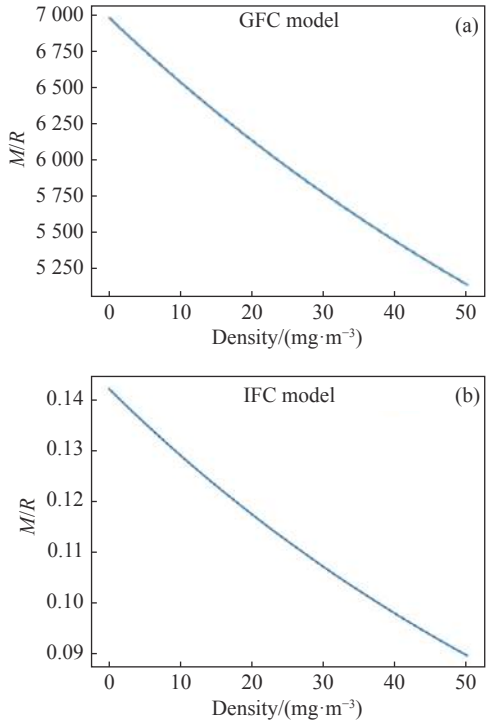

图 5 GFC 和 IFC 模型中，NO_2 测量信号和参考信号之比随气候浓度的变化情况

Fig. 5 The ratio of the measurement to the reference signal of NO_2 varying with gas density at the GFC model and IFC model

从图 4 和图 5 中可以看出，在 GFC 模型下，NO 的 *M*/*R* 在 1.4 左右，如图 4(a) 所示，零点和量程浓度下的 *M*/*R* 变化为 0.05。NO_2 的 *M*/*R* 超过 5000，零点和量程浓度下的比值变化接近 2000，如图 5(a) 所示，过大的偏差给放大电路的设计提出了苛刻要求。在 IFC 模型中，NO 的 *M*/*R* 在 0.5 左右，零点和量程浓度下的比值变化为 0.0175，NO_2 的 *M*/*R* 在 0.12 附近，零点和量程浓度下的比值变化为 0.05，如图 4(b) 和 5(b) 所示。为了实现 NO 和 NO_2 的同时测量，并考虑后续放大电路的可实现性及制造成本，确定测量技术的原则如下：

（1）*M* 和 *R* 信号偏差不应在 1 个数量级以上，以提升硬件的可实现性；

（2）*M*/*R* 值的变化范围在设定气体浓度范围内应尽可能大，以提高系统分辨率。

基于上述原则，确定了 NO 和 NO_2 的测量技术分别为 GFC 和 IFC。同样，采用该模型确定了 SO_2、CO 和 CO_2 的测量技术，可以看出梳状吸收光谱的气体 CO 宜采用 GFC 技术，而包络型吸收光谱的气体 SO_2、CO_2 宜采用 IFC 技术。

4 多组分微量气体分析系统构成

第 3 节通过仿真计算，给出了分析系统的有效光程，滤光片中心波长和带宽等核心参数，以及待测气体浓度与测量和参考信号的关系，为系统构建奠定了理论基础。

多组分微量气体分析系统主要由光学系统、结构系统、流路系统、电路系统以及数据采集与处理系统等 5 个模块组成，如图 6 所示，其中光学系统和电路系统是分析系统的两个核心模块，将做详细介绍。

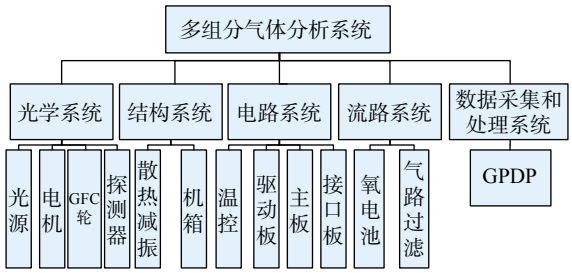

图 6 多组分气体分析系统构成

Fig. 6 Composition of multi-component gas analysis system

4.1 光学系统

作为分析系统核心模块的光学系统如图 7 所示。光源发出的红外光，由 GFC 轮调制，经平面反射镜耦合进入恒温控制的多次回返气体室，通过离轴抛物镜聚焦到探测器上，通过建立信号强度与气体浓度的对应关系，实现气态污染物浓度的检测。

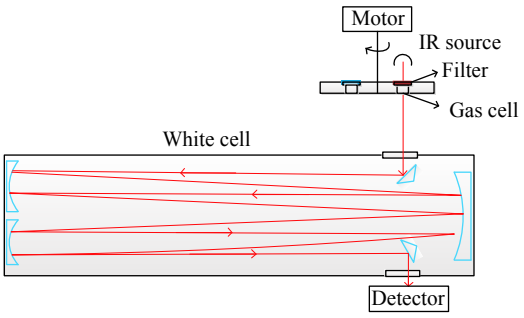

图 7 分析系统中光学系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the optical system for the proposed system

GFC 轮模块、多次回返气体室和探测器模块采用刚性连接，用隔热材料隔离，保证各模块不同

的温控要求, 光机系统结构如图 8 所示。

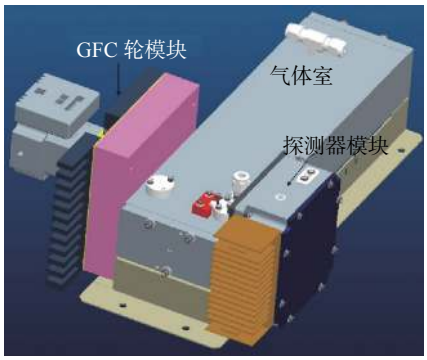

图 8　光机系统结构示意图

Fig. 8　Structure diagram of the optical mechanical system

GFC 轮模块由红外辐射光源、电机和 GFC 轮 3 部分组成。其中, GFC 轮由斩波轮、滤光片轮和气体滤波轮 3 部分组成, GFC 轮采用整体化设计。气体滤波轮上均匀分布 NO、CO 和 N_2 气体池, 作为 GFC 轮的主体结构, 各滤光片通过斩波轮固定在气体滤波轮上, 电机带动 GFC 轮实现对红外光源的调制。

滤光片轮上依次安装匹配待测气体特征吸收波段的滤光片, 特定浓度的 CO_2、CO、NO_2、NO、SO_2、CH_4 和 H_2O 的特征吸收光谱如图 9(彩图见期刊电子版)所示。从图 9 中可以看出, 通过优化滤光片的中心波长, 并采用窄带滤光片可以实现气态污染物特征吸收波段的选取。其中, 滤光片中心波长的设计是本系统的关键。以 CO_2 滤光片为例, 为了满足固定物污染源烟气量程需求, CO_2 滤光片的中心波长选择偏离吸收峰(4.26 μm)的 4.4 μm, 80% 以上的透过率, 同时带宽减小到 90 nm, 以避免 25% 浓度 CO_2 的饱和吸收。

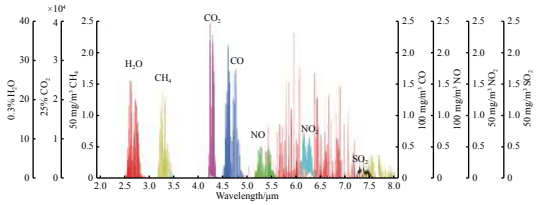

图 9　待测气体特征吸收光谱

Fig. 9　Characteristic spectra of the gas to be measured

气体池充高浓度(在 85% 以上)待测气体或高纯 N_2, 每个气体池可独立安装在气体滤波轮上, 当红外光通过充高浓度待测气体的气体池时, 相应波段红外光几乎被完全吸收, 配合窄带滤光片形成一个纯净的背景, 作为背景信号。红外光可以完全通过高纯 N_2 气体池, 配合窄带滤光片作为测量信号。窗口片采用在红外波段有较高透过率的材料, 窗口片通过粘接或焊接的方式与腔体连接成一体, 以满足极高的气密性要求。研制的气体池吸光度曲线如图 10 所示, 图 10(a) 和图 10(b) 分别为用于参考通道和测量通道的 NO 和 N_2 气体池吸光度曲线。

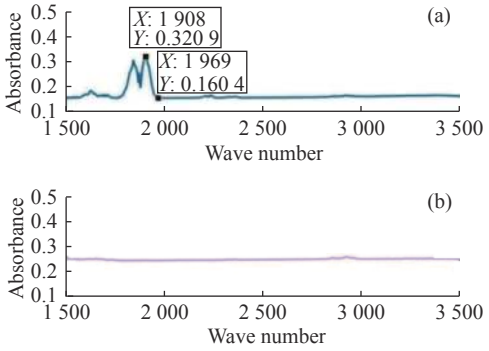

图 10　气体池吸光度曲线。(a) NO 吸光度曲线; (b) N_2 吸光度曲线

Fig. 10　Absorption of (a) NO and (b) N_2 gas cell

4.2　电路系统

电路系统的硬件框图如图 11 所示, 主要包括 32 位的 ARM 控制和处理模块, 红外信号调理与 16 位 ADC, 压力传感器测量气体室内的压力, 用于压力补偿, 氧电池用于 O_2 测量, 温控模块控制气体室、GFC 轮模块和探测器模块的温度, TEC 用于 MCT 探测器的制冷, 液晶显示可用于人机交互, 电机驱动模块驱动电机实现 GFC 轮对光源的调制, 通信模块包括多路 I/O 接口, RS-232/485 以及 4~20 mA 输出。

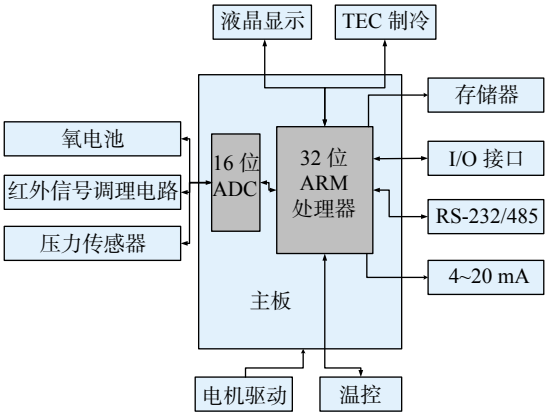

图 11　系统硬件框图

Fig. 11　Block diagram of system hardware

5 多组分微量气体分析系统性能

5.1 检出限

检出限是分析系统的核心指标之一，反映其灵敏度，测量和计算方法参考《HJ 76-2017 固定污染源烟气（SO_2、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》（简称 76 标准）。

分析系统预热稳定后开始正常测量，通入零气（通常为高纯 N_2），每隔 2 min 记录该时间段数据的平均值（记为 1 个数据），记 r_i，获得 30 个浓度数据，计算其标准偏差，定义为零点噪声 S_L，即

$$S_L=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(r_i-\bar{r})^2}{n-1}}\quad , \tag{8}$$

其中，S_L 为零点噪声，r_i 为间隔 2 min 时间段数据的平均值，$\bar{r}$ 为 30 个浓度数据的平均值，n=30。

红外多组分微量气体分析系统的波动如图 12（彩图见期刊电子版）所示。图 12(a) 和图 12(b) 分别为 NO_2、NO、CO 和 SO_2 以及 CO_2 的零点噪声。从图 12 可以看出，相同条件下，NO 零点的浓度波动为−0.1~0.4 mg/m³，大于其他组分的被测气体，这是由于在相同条件下 NO 的吸光度小，分辨率低导致的。

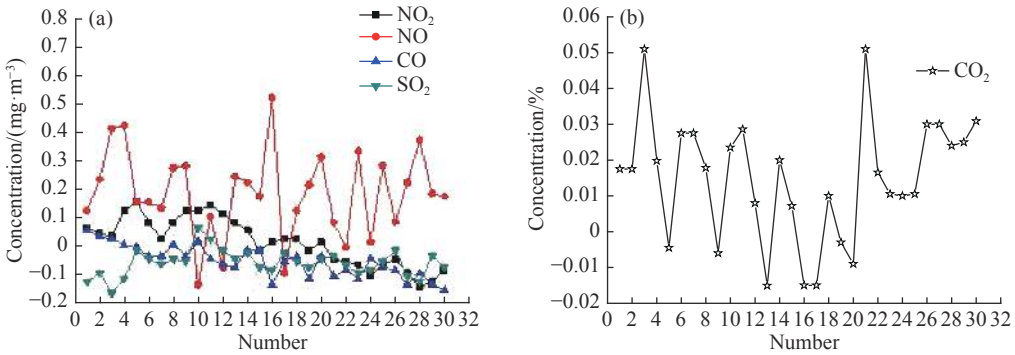

图 12 分析系统 (a) NO_2、NO、CO 和 SO_2 的零点噪声及 (b)CO_2 的零点噪声

Fig. 12 Zero noise of (a) NO_2、NO、CO、SO_2 and (b) CO_2 of analysis system

检出限为 3 倍的零点噪声，如表 2 所示，对于 CO、NO_2、NO、SO_2 的检测，分析系统可实现亚 mg·m^{-3} 的检出限，CO_2 的检出限可以达到 0.05%。

表 2 分析系统的检出限

Tab. 2 Detection limit of the multi-component analysis system

不同气体	检出限
SO_2/(μg·m^{-3})	50
NO/(μg·m^{-3})	350
NO_2/(μg·m^{-3})	120
CO/(μg·m^{-3})	130
CO_2/(%)	0.05

5.2 零点和量程漂移

24 h 零点和量程漂移是分析系统的又一核心指标，反映其稳定性和可靠性，测量和计算方法参考 76 标准。

分析系统预热稳定后开始进行正常测量，通入零气（通常为高纯 N_2），记录分析系统零点稳定读数 Z_0，然后通入量程标气，记录稳定读数 S_0。待分析系统连续运行 24 h（期间不允许任何校准和维护）后再分别通入同一浓度的零气和标气，设记录稳定后的读数分别为 Z_n 和 S_n，按式（9）~式（12）分别计算系统 24 h 的零点和量程漂移，即

$$\Delta Z_n=Z_n-Z_0\quad , \tag{9}$$

$$Z_d=\frac{\Delta Z_n}{R}\times 100\%\quad , \tag{10}$$

其中，Z_d 为分析系统 24 h 零点漂移，ΔZ_n 为分析系统运行 24 h后的零点变化值，R 为分析系统满量程值。

$$\Delta S_n=S_n-S_0\quad , \tag{11}$$

$$S_d=\frac{\Delta S_n}{R}\times 100\%\quad , \tag{12}$$

其中, S_d为分析系统 24 h 量程漂移, ΔS_n为分析系统运行 24 h 后的量程点变化值。

系统的 24 h 的零点和量程漂移不超过±2%F.S.(Full Scale, F.S.), 如表 3 所示。

表 3　分析系统的零点和量程漂移

Tab. 3　Zero and span drift of multi-component analysis system

	24 h漂移(%F.S.)	
	零点	量程
NO	1.48	−1.06
NO_2	−0.55	0.61
CO_2	0	−0.71
CO	0.4	0.49
SO_2	1.85	1.27

5.3　现场运行情况

2021 年 2 月 14 日上午 9 点到 2021 年 2 月 17 日上午 7 点, 分析系统在江苏某钢厂的小时值监测数据如图 13(彩图见期刊电子版)所示。从图 13 中可以看出, 在锅炉工作期间, CO 平均浓度达到 750 mg/m³, SO_2 平均浓度为 2.2 mg/m³, NO 平均浓度为 18.3 mg/m³, NO_2 平均浓度为 29.7 mg/m³, O_2 平均浓度稳定在 18.1% 附近, CO_2 平均浓度为 4.3%。停炉期间, O_2 浓度上升至环境空气浓度的 21%, 气态污染物浓度下降至零, 很好地反映了工艺过程。

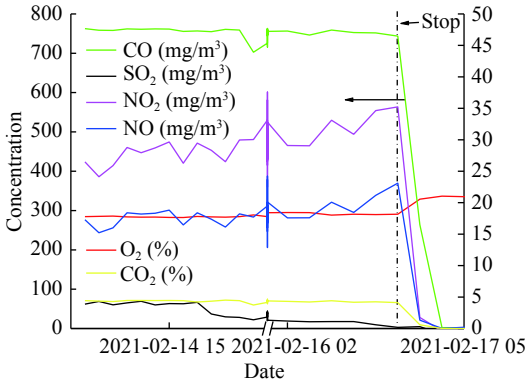

图 13　分析系统的现场运行情况

Fig. 13　In-situ operation of the analysis system

6　结　论

本文从理论仿真出发, 构建了系统核心参数与探测信号的关系, 为分析系统研制提供了理论支持。构建的红外多组分微量气体分析系统采用 GFC−IFC 技术, 在时域上实现了双光路测量, 降低了光源能量波动和交叉干扰的影响, 提高了测量精度和稳定性, 其中, CO、NO_2、NO、SO_2 的检出限优于 500 μg/m³, CO_2 的检出限达到 0.05%, 24 h 的零点漂移优于 1.85% F.S., 量程漂移优于 1.27% F.S., 性能指标能同时满足超低排放和碳排放的监测需求。现场运行情况良好, 很好地反映了锅炉的工艺过程。系统集成度高, 可根据不同工况灵活配置被测气体组分, 具备较强的应用拓展性。

参考文献:

[1]　李相贤, 徐亮, 高闽光, 等. 分析温室气体及CO_2碳同位素比值的傅里叶变换红外光谱仪[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2359-2368.
LI X X, XU L, GAO M G, *et al*.. Fourier transform infrared greenhouse analyzer for gases and carbon isotope ratio[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2359-2368. (in Chinese)

[2]　张志荣, 夏滑, 董凤忠, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(11): 2771-2777.
ZHANG ZH R, XIA H, DONG F ZH, *et al*.. Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2771-2777. (in Chinese)

[3]　季文海, 吕晓翠, 胡文泽, 等. TDLAS技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(8): 1837-1845.
JI W H, LÜ X C, HU W Z, *et al*.. Application of TDLAS technology to multicomponent detection in olefin production process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1837-1845. (in Chinese)

[4]　SUN Y W, LIU W Q, WANG SH M, *et al*.. Method of sensitivity improving in the non-dispersive infrared gas analysis system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(6): 060101.

[5]　徐驰, 刘娟, 居力, 等. 非分散红外法应用于在用柴油车NO_x排放检测的研究[J]. 中国环境监测, 2019, 35(3): 28-33.
XU CH, LIU J, JU L, *et al*.. Research of NDIR applied on measuring NO_x emission from in-use diesel vehicles[J].

Environmental Monitoring in China, 2019, 35(3): 28-33. (in Chinese)

[6] 刘通浩, 张守斌, 敬红, 等. 甲烷对非分散红外吸收法测定固定污染源废气中二氧化硫的干扰[J]. 中国环境监测, 2020, 36(6): 143-149.
LIU T H, ZHANG SH B, JING H, *et al*.. Study on the interference of methane to the determination of sulfur dioxide in stationary pollutant exhaust gas by non-dispersive infrared absorption method[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(6): 143-149. (in Chinese)

[7] 李唐安, 李世阳, 张家明, 等. 基于Goertzel算法的红外气体检测方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 0304003.
LI T A, LI SH Y, ZHANG J M, *et al*.. Infrared detection method of gas based on Goertzel algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0304003. (in Chinese)

[8] 高颖, 戴连奎, 朱华东, 等. 基于拉曼光谱的天然气主要组分定量分析[J]. 分析化学, 2019, 47(1): 67-76.
GAO Y, DAI L K, ZHU H D, *et al*.. Quantitative analysis of main components of natural gas based on Raman spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(1): 67-76. (in Chinese)

[9] 聂新明, 陈正毅, 宗成华, 等. 环境中挥发性污染物现场快捷检测系统研究[J]. 分析化学, 2020, 48(8): 981-989.
NIE X M, CHEN ZH Y, ZONG CH H, *et al*.. A rapid on-site detection system for volatile pollutants in environment[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2020, 48(8): 981-989. (in Chinese)

[10] 温国基, 戴连奎, 刘薇, 等. 基于遗传算法与线性叠加模型的混合物组成拉曼光谱定量分析[J]. 分析化学, 2021, 49(1): 85-94.
WEN G J, DAI L K, LIU W, *et al*.. Raman spectroscopic quantitative analysis based on genetic algorithm and linear superposition principle[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 49(1): 85-94. (in Chinese)

[11] 孙友文, 刘文清, 汪世美, 等. 非分散红外多组分气体检测技术及其在CEMS中的应用[J]. 红外, 2011, 32(5): 23-26.
SUN Y W, LIU W Q, WANG SH M, *et al*.. Non-dispersive infrared multi-component gas analysis technology and it's application in CEMS[J]. *Infrared*, 2011, 32(5): 23-26. (in Chinese)

[12] 叶刚, 赵静, 陈建伟. 基于NDIR原理的多组分气体在线监测系统的设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(8): 115-119, 188.
YE G, ZHAO J, CHEN J W. Design and implementation of multicomponent gas online monitoring system based on NDIR[J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(8): 115-119, 188. (in Chinese)

[13] 熊涛, 高明, GIBSON D, 等. 新型光室结构的主流式NDIR呼吸CO_2监测系统[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(6): 20190575.
XIONG T, GAO M, GIBSON D, *et al*.. Mainstream NDIR breathing CO_2 monitoring system based on new light chamber structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190575. (in Chinese)

[14] SEBACHER D I. A gas filter correlation monitor for CO, CH_4, and HCL[R]. NASA Technical Papers 1113. Langley Station: National Aeronautics and Space Administration, 1977: 10.

[15] 司福祺, 刘建国, 刘文清, 等. 基于气体相关滤波技术的非分散红外CO气体监测系统的研究[J]. 量子电子学报, 2004, 21(4): 425-428.
SI F Q, LIU J G, LIU W Q, *et al*.. Non-dispersive infrared instrument based on gas filter correlation technology for atmospheric CO monitoring[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, 21(4): 425-428. (in Chinese)

[16] 陈晓宁, 刘建国, 司福祺, 等. 气体滤波相关技术在红外甲烷监测系统中的应用[J]. 光电工程, 2008, 35(4): 49-52.
CHEN X N, LIU J G, SI F Q, *et al*.. Application of gas filter correlation technique in IR monitoring system of methane[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(4): 49-52. (in Chinese)

作者简介：

谢　耀(1982—), 男, 浙江兰溪人, 副研究员, 2005 年、2007 年、2011 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位, 2019 年 7 月博士后进站聚光科技(杭州)股份有限公司工作站和浙江大学环境科学与工程流动站, 主要从事光电探测和光谱学方面的研究。E-mail: xie_yao3@163.com