

## 基于 NDIR 方法的多组分气体检测系统

孙友文, 刘文清, 汪世美, 黄书华, 于晓曼

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 提出了一种非分散红外多组分气体分析仪的系统设计方案, 设计的滤光轮起到了光学滤波和调制光波的双重作用, 多次反射池有效地增加了气体的吸收光程, 分析仪使用一个探测器就能完成多种气体的测量。综合考虑光源辐射强度、滤光片透过率及探测器响应能力的影响, 通过理论分析计算与实验研究, 获得了各通道理想的零气背景信号。对分析仪进行了浓度定标, 各目标滤波通道的定标拟合相关系数均在 0.998 以上。将分析仪的实际测量值与标准值进行比较, 各种气体的测量相关系数均在 0.99 以上。

**关键词:** 非分散红外; 多组分测量; 系统设计

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)04-1062-07

## Non-dispersive infrared multi-component gas analysis system

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

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics  
and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A type of optical system design for non-dispersive infrared (NDIR) multi-component gas analyzer was described. The filter wheel of this system could both filter and modulate the optical signal and its multiple reflection cell could increase the effective optical path length of the modulated optical signal. The analyzer had the ability of measuring multiple gases with one detector. Radiation intensity of the optical source, transmission of the filters and response ability of the detector were all taken into account when doing theoretic analytical calculation and experimental study. The best zero gas signal intensity at each filter channel was obtained. The concentration inversion relationship of each filter channel after interference correction was calibrated. The fitting correlation coefficients of all filter channels are above 0.998. When the measured concentration readings of NDIR gas analyzer is compared with the standard concentrations, the measuring correlation coefficients are all above 0.99.

**Key words:** non-dispersive infrared; multi-component; optical system

收稿日期: 2011-08-22; 修订日期: 2011-09-19

基金项目: 863 重大课题(2009AA063006); 国家自然科学基金(4080501); 安徽省优秀青年科技基金(10040606Y28)

作者简介: 孙友文(1985-), 男, 博士生, 主要从事光学检测和光谱学方面的研究。Email: ywsun@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学检测和光谱学方面的研究。Email: wqliu@aiofm.ac.cn

### 0 引言

工业污染源排放的废气中通常包括:CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, NO 等。由于这些有害排放物对环境具有潜在威胁,很多国家都监测不同类型废气的排放,以确保排放的气体浓度符合相关标准<sup>[1]</sup>。目前烟气污染物的分析方法主要有电化学方法、差分吸收光谱(DOAS)法、傅里叶变换光谱(FITR)法和非分散红外(NDIR)法<sup>[2-3]</sup>。然而,电化学方法使用寿命短,DOAS方法无法测量 CO<sub>2</sub>、CO 等在紫外波段没有明显特征吸收的气体, FITR 仪器结构复杂、价格昂贵。相比之下, NDIR 方法具有结构简单、成本低、稳定性好、测量组分多、测量精度高等优点,是工业污染源连续排放监测系统(CEMS)的理想监测设备<sup>[4-5]</sup>。

文中介绍一种成本低、结构简单的 NDIR 气体分析仪。该分析仪可以用于测量工业污染源排放的多种废气,通过添加或更换滤光片还能实现组分可扩展或量程可扩展测量。

### 1 设计原理

NDIR 方法测量  $N$  组分气体浓度的基理为朗伯比尔(Lambert-Beer)定律<sup>[6]</sup>,如下:

$$\begin{cases}
 A_{total}^1 = \ln\left(\frac{I_0^1}{I_s}\right) = k_{11}A_1 + k_{12}A_2 + k_{13}A_3 + \dots + k_{1n}A_n \\
 A_{total}^2 = \ln\left(\frac{I_0^2}{I_s}\right) = k_{21}A_1 + k_{22}A_2 + k_{23}A_3 + \dots + k_{2n}A_n \\
 \vdots \\
 A_{total}^n = \ln\left(\frac{I_0^n}{I_s}\right) = k_{n1}A_1 + k_{n2}A_2 + k_{n3}A_3 + \dots + k_{nn}A_n
 \end{cases} \quad (1)$$

$$C_i = A_i / \alpha_i L, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $A_{total}^i$  为第  $i$  滤波通道的总吸光度; $I_0^i$  和  $I_s^i$  分别表示第  $i$  滤波通道零气背景与目标气体背景下的光强; $k_{ij}$  为气体  $j$  在第  $i$  滤波通道的响应系数; $A_i$  为气体  $I_0^i$  的吸光度; $C_i$  与  $\alpha_i$  分别表示气体  $i$  的浓度和吸收系数; $L$  表示光信号在样品池内多次反射后的实际吸收光程。以上分析,  $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

公式(1)和(2)给出了同时测量  $N$  种气体浓度的方法。每一滤波通道的总吸光度都可以表示为一列气体吸光度的叠加,根据气体的“指纹”吸收特征,

通过合理的波段选择,分析仪可以根据探测器检测到的不同波段的信号强度,通过建立和求解多元线性回归方程组的方法来获取气体的吸光度并将其反演为浓度<sup>[7]</sup>。

### 2 设计方案

#### 2.1 系统装置设计

设计的 NDIR 多组分气体分析仪如图 1 所示,主要包括红外辐射光源、滤光轮、多次反射池、探测器及数据分析系统。分析仪工作时,光信号依次通过滤光轮、样品池后照在探测器上。滤光轮对光信号进行滤波和调制,数据分析系统实现干扰扣除和浓度反演。

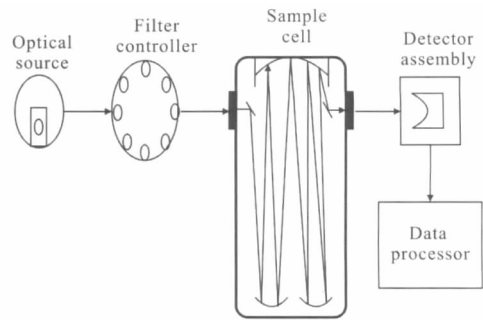


图 1 多组份气体分析系统装置图

Fig.1 Installation diagram of multi-component gas analysis system

分析仪选择具有类黑体辐射的镍铬合金丝作为红外光源<sup>[7]</sup>,并由开关电源配以精密功率电阻供电,使其工作在恒流状态。通过调节供电电压可以改变光源的辐射温度,两者具有以下近似关系: $T=100 \times V(K)$ 。图 2 为不同辐射温度下,光源的辐射特性变化规律。

滤光轮上包括不同参数的窄带滤光片以滤掉一定频带的光信号,滤光片之间由不透明的金属片均

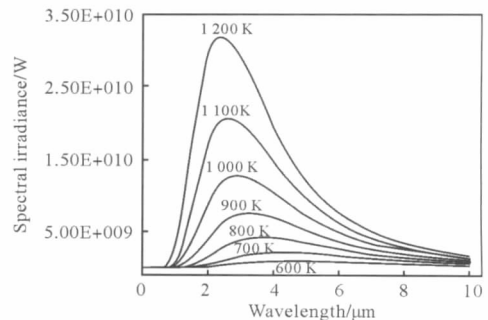


图 2 光源的辐射波长、强度分布随温度的变化关系

Fig.2 Intensity distribution and temperature dependency versus wavelength of light source

匀分隔开。当同步电机控制滤光轮转动时,光信号交替地被挡住或通过样品池,起到了光学滤波和调制光波的双重作用。滤光轮上各滤光片的分布如图 3 所示,空白光孔的设计可以更方便地调整系统光路;滤光轮上设计了两个参考滤光片,参考通道 1 可以为参考通道 2 建立良好的预采样,以获得更加准确

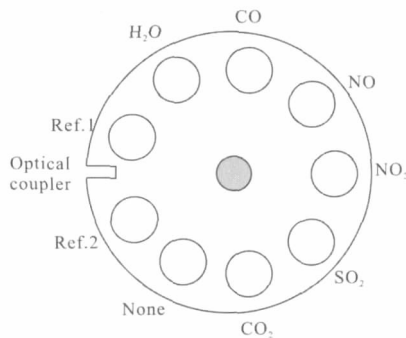


图 3 滤光轮上的各滤光片分布

Fig.3 Distribution of various filters on the filter wheel

的参考信号,修正系统的飘移;为了扣除分析仪的使用环境中水汽对其他待测气体的干扰以提高仪器的检测准确度,分析仪专门设置了水汽滤波通道,使仪器能工作在潮湿或水汽变化的环境中。图 4 为红外区域各组分气体的红外吸收光谱图,相应的各滤光片参数设置如表 1 所示。

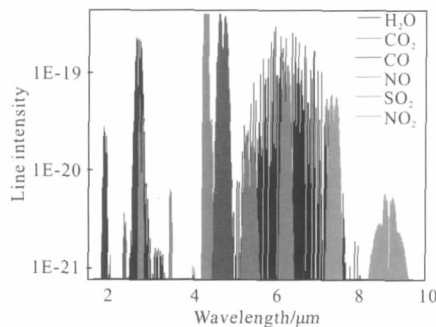


图 4 六种组分气体的红外吸收光谱

Fig.4 Infrared absorption spectrum of 6 molecules

表 1 各滤光片参数设置

Tab.1 Parameter settings of each filter

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Components	Ref.1	Ref.2	CO	CO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Center wavelength/ $\mu\text{m}$	3.55	3.85	4.6	4.3	5.25	6.3	7.45	2.59
Transmission	76%	72%	80%	93%	80%	73%	85%	94%

设计的多次反射池,通过三个球面镜之间的多次反射增加了气体的吸收光程(样品池长 60 cm,反射次数 20 次,实际光程 12.36 m),提高了分析仪的检测灵敏度。为了避免水汽冷凝对样品池的破坏,温度控制器使其维持在 70℃。

探测器选择在 2~8  $\mu\text{m}$  具有良好响应特性的硒化锌探测器(#SA386T, USA)。为了避免温度波动对探测器性能的影响,将其封装在样品池内,即与样品池保持恒温。

## 2.2 各通道信号强度分析

由于设计的分析仪只有一个探测器,为了便于后续信号采集、放大和数据处理,实现多组分气体的同时检测,必须保证零气背景下各滤波通道的信号强度大体一致。为此,对各个通道的信号强度进行了理论分析,综合考虑了光源辐射强度、滤光片透过率及探测器响应能力的影响。

假设光源是温度为  $T$  的黑体,滤光片的透过率为  $\tau(\lambda)$ ,探测器的响应强度为  $r(\lambda)$ , $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为滤光片的截止波长,那么该滤波通道内的信号强度可以表示为:

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(T, \lambda) \tau(\lambda) r(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

式中: $B(T, \lambda)$ 为光源的辐射强度,可根据普朗克黑体辐射公式计算得到<sup>[8]</sup>;  $\tau(\lambda)$ 可从滤光片参数中得到;  $r(\lambda)$ 可从探测器说明书中得到。对具体分析仪而言,滤光片和探测器选定之后,可通过改变光源辐射温度来达到以上目的。

为简化计算,可作以下近似处理:滤光片带宽内,波长  $\lambda$  处的滤光片透过率  $\tau(\lambda)$ 、光源辐射强度  $B(T, \lambda)$ 及探测器响应强度  $r(\lambda)$ 分别由中心波长  $\lambda_0$  处的透过率  $\tau(\lambda_0)$ 、辐射强度  $B(T, \lambda_0)$ 及响应强度  $r(\lambda_0)$ 代替。经过多组数据分析和理论计算得出,当光源辐射温度为 576 K 时,零气背景下各滤波通道的信号强度最为均匀。此时:

$$B(576 \text{ K}, \lambda) = 3.75 \times 10^{14} / \lambda^5 \times 1 / (\exp(25.2/\lambda) - 1) \quad (4)$$

由公式(4)可计算出各个波长处的辐射强度,将各滤波通道的辐射强度、相应滤光片的透过率及探测器响应强度代入公式(3),可计算出各个滤波通道的信号强度,归一化之后如表 2 所示。从表 2 可以得出,此时各通道信号强度的最大值与最小值之比在两倍以内,有利于各个滤波通道吸光度的提取<sup>[9-10]</sup>。

表 2 各通道的透光强度比较

Tab.2 Comparison of light transmission intensity of each channel

	CO <sub>2</sub> (4.3 μm)	SO <sub>2</sub> (7.45 μm)	NO <sub>2</sub> (6.3 μm)	NO(5.25 μm)	CO(4.6 μm)	H <sub>2</sub> O(2.58 μm)	Ref.1(3.55 μm)	Ref.2(3.85 μm)
Ratio of filters parameters	1.44	1.07	1.71	1.76	1.51	6.16	1.21	1
Radiation intensity (optical source)/100 W·m <sup>-2</sup>	7.3×10 <sup>8</sup>	5.8×10 <sup>8</sup>	7.0×10 <sup>8</sup>	7.8×10 <sup>8</sup>	7.6×10 <sup>8</sup>	1.89×10 <sup>8</sup>	5.5×10 <sup>8</sup>	6.38×10 <sup>8</sup>
Ratio of radiation intensity	3.86	3.07	3.7	4.13	4.02	1	2.91	3.38
Ratio of response intensity (detector)	1.21	1	1.12	1.16	1.3	1.11	1.17	1.19
Ratio of signal intensity under zero gas	1.89	1	1.53	1.93	1.85	1.94	1.08	1.02

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 各通道信号测试

待分析仪工作稳定后,以约 2 L/min 的速度往样

品池中通入零气(氮气),待样品池洗净后,封闭样品池,记下不同电压下各通道的信号强度。不同电压下各滤波通道的信号强度之比如表 3 所示(已归一化),相应的变化规律如图 5 所示。从表 3 和图 5 可以看出,电压设置为 5~6.5 V 时,通道信号强度的最

表 3 归一化的不同电压下各滤波通道零背景信号强度之比

Tab.3 Normalized background amplitude ratio of each channel under different voltage

	12 V	11.5 V	11 V	10.5 V	10 V	9.5 V	9 V	8.5 V	8 V	7.5 V	7 V	6.5 V	6 V	5.5 V	5 V
CO <sub>2</sub>	3.1	3.04	2.96	2.89	2.74	2.69	2.61	2.49	2.37	2.23	2.14	1.98	1.81	1.65	1.41
SO <sub>2</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NO <sub>2</sub>	1.4	1.45	1.46	1.43	1.43	1.44	1.44	1.48	1.44	1.4	1.42	1.41	1.39	1.39	1.35
NO	2.34	2.22	2.22	2.23	2.12	2.11	2.11	2.07	2.01	1.95	1.96	1.87	1.82	1.76	1.68
CO	3	2.9	2.85	2.75	2.64	2.56	2.56	2.46	2.37	2.23	2.16	2.05	1.9	1.77	1.58
H <sub>2</sub> O	6.16	6	5.57	5.32	4.95	4.31	4.31	3.91	3.5	3.05	2.7	2.07	1.86	1.5	1.08
Ref.1	1.88	1.78	1.72	1.64	1.55	1.47	1.47	1.4	1.29	1.21	1.16	1.04	0.91	0.8	0.65
Ref.2	1.94	1.86	1.78	1.68	1.62	1.53	1.53	1.45	1.34	1.21	1.16	1.04	0.93	0.8	0.67

大值与最小值之比都小于 2, 都可以获得较好的零气背景信号,其中最理想值为 6V。此时,单个采样周

期内,各滤波通道的零气背景信号强度如图 6 所示,

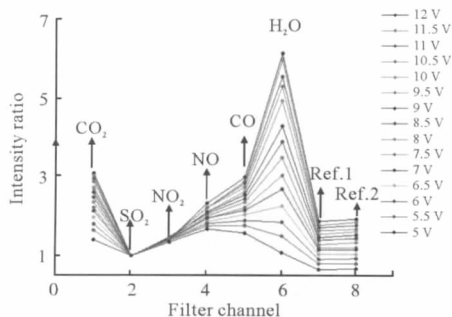


图 5 归一化的不同电压下各通道背景幅值比

Fig.5 Normalized background amplitude ratio of each channel under different voltage

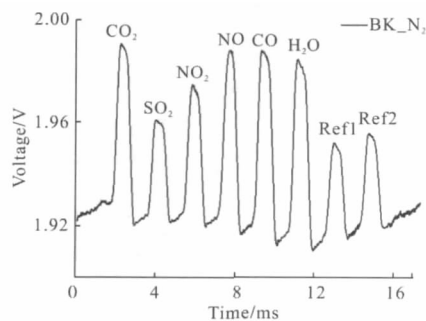


图 6 零气背景下各通道信号强度实测图

Fig.6 Measured signal intensity of each channel under zero-gas background

从图中可以看出,各滤波通道信号强度比较均匀。由光源辐射温度与电压的关系可以得出,实际测量的最理想辐射温度(约 600 K)与理论计算值(576 K)有一定偏差,偏差可能来自于以下原因:光源并非绝对满足黑体辐射特性,近似计算方法上的偏差等。

### 3.2 多组分检测测试

#### 3.2.1 仪器定标

往样品池中通入不同浓度的各组分待测气体,扣除水汽干扰和交叉干扰之后,可以拟合出各滤波通道的浓度反演关系。为了提高系统的检测精确度并扩大系统的动态检测范围,分析仪中的每一滤波通道均采用三阶多项式拟合<sup>[11-12]</sup>。图 7 为拟合后各组分气体的浓度与吸光度的对应关系,横坐标为气体吸光度,纵坐标为气体浓度。从图中可以看出,每种组分气体的定标拟合相关系数都在 0.998 以上。

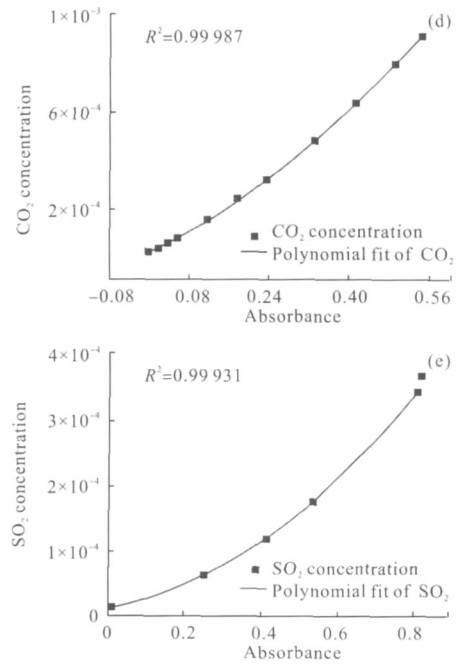
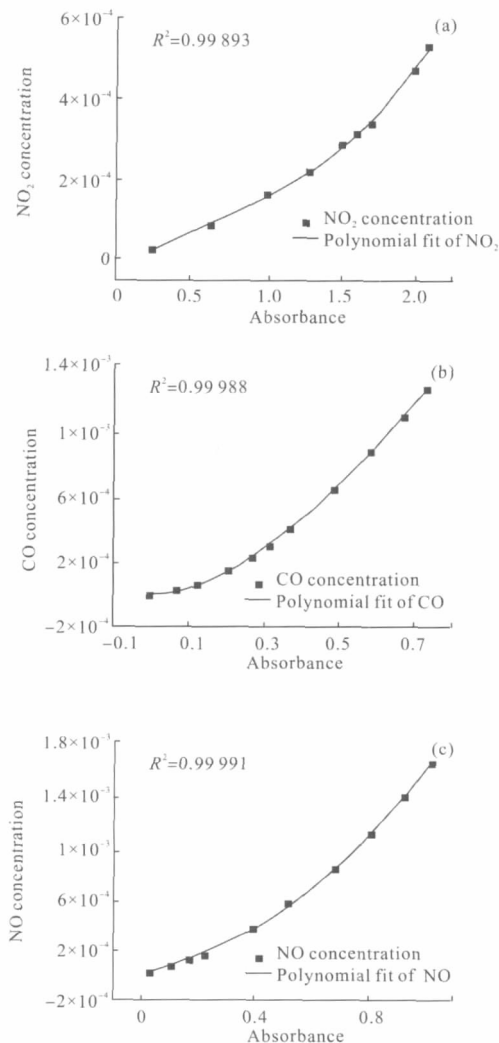


图 7 干扰扣除后各滤波通道的浓度反演关系图

Fig.7 Concentration inversion relationship of each filter channel after interference correction

#### 3.2.2 浓度测量

各滤波通道浓度与吸光度的关系确定之后,即可实现未知浓度气体的测量。当样品池中存在多种未知浓度的气体时,假如干扰扣除后,某一气体的吸光度为  $A_i$ , 那么样品池中该组分气体的浓度可以表示为<sup>[13-15]</sup>:

$$C_i = f(A_i) \times k_i + j_i \quad (5)$$

$$f(A_i) = aA_i^3 + bA_i^2 + cA_i + d \quad (6)$$

式中:  $C_i$  表示该组分气体的浓度( $\times 10^{-6}$ );  $k_i$  为跨度校准系数;  $j_i$  为零校准系数,这两个系数均可在校准时获得;  $f(A_i)$  为三次多项式,各次项系数可由系统定标得到,例如,对  $\text{NO}_2$  而言,  $f(A_i) = 63.19A_i^3 - 118.7A_i^2 + 239.42A_i + 27.01$ 。

根据以上分析,对各滤波通道的浓度测量准确度做了测试:将分析仪进行跨度校准和零校准之后,往样品池中通入不同浓度的各组分标准样气,并将分析仪的浓度读数与标准值进行比较。图 8 为分析仪实际测量的各组分气体浓度值与标准值的相关度对照图,横坐标为标准气体浓度,纵坐标表示实测浓度。从图中可以看出,测量值与标准值的相关系数均在 0.99 以上。综上所述,设计的分析仪能够达到多组分气体同时准确测量的目标。



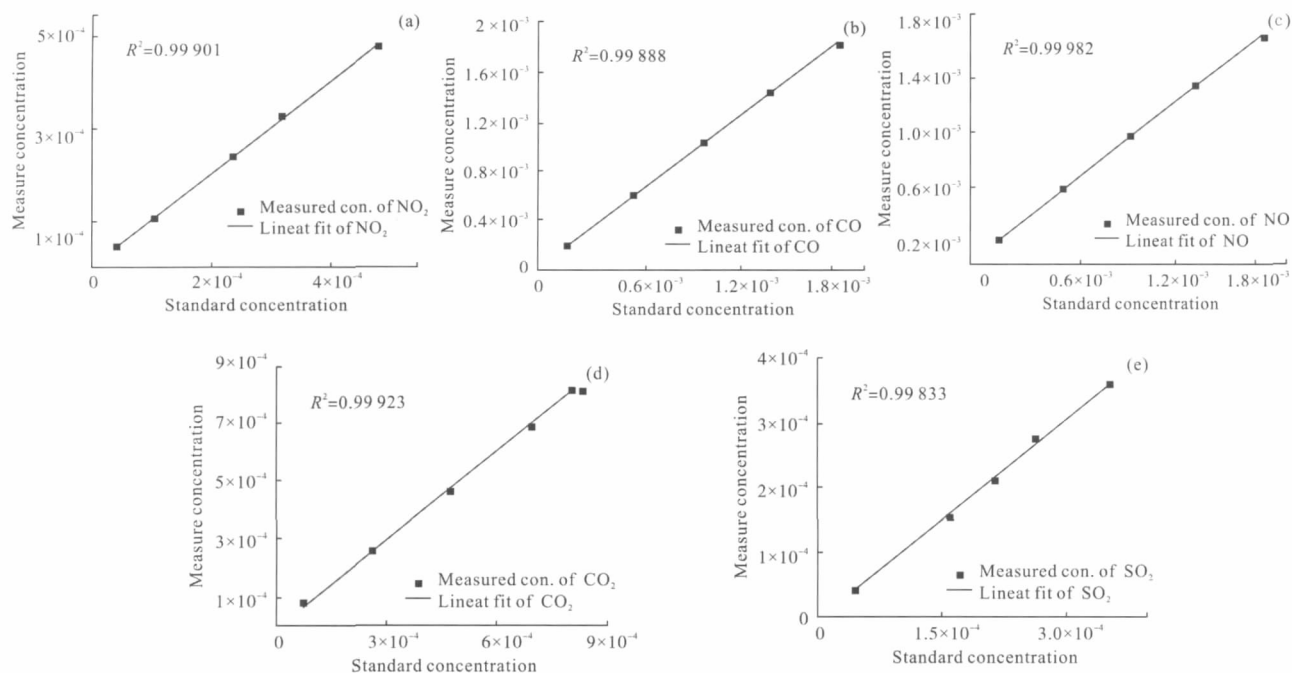


图8 系统各气体测量值与标准值的相关度对照图

Fig.8 Comparison between measured concentration and standard concentration of each gas

## 4 结论

文中开展了基于 NDIR 方法的多组分气体检测系统研究,提出了一种 NDIR 多组分气体分析仪的设计方案。设计的分析仪能集光学滤波和调制光波于一体,使用一个探测器即可完成多组分气体的测量,与传统 NDIR 多组分分析仪相比具有结构简单、成本低等优点。

对分析仪的各通道信号强度比值和测量准确度进行了测试,结果表明:设计的 NDIR 分析仪可以实现多组分气体的准确测量,干扰扣除后,各滤波通道的浓度定标拟合相关系数均在 0.998 以上,仪器实测值与标准值的相关系数均在 0.99 以上。

此外,多组分分析仪的测量准确度和精确度还与良好的干扰扣除方法,待测气体流速、气压、温度的稳定性及系统光源辐射稳定性、系统抗噪声能力等因素有关,在以后工作中笔者将着重开展这些方面的研究,以进一步提高仪器性能。

### 参考文献:

[1] Christopher F H, Roupail N M, Unal A, et al. Measurement of on-road tailpipe CO, NO, and hydrocarbon emissions

using a portable instrument [C]//Annual Meeting of Air & Waste Management Association, 2001.

- [2] Williams Kevin G, Christensen Kim S. Multi-gas NDIR Analyzer: US 5811812[P]. 1998-09-22.
- [3] Dirk Appel, Marzoratti Gaston E, Nabar Shrikrishna H, Mouradian Robert F. Gas Analyzer System: US 0213380 A1 [P]. 2009-08-27.
- [4] Lessure Harold S, Satoru Simizu, Denes Harold S, et al. None-dispersive infrared gas analyzer with interfering correction: US 5886348[P]. 1999-03-23.
- [5] Ding Lei, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Investigation on remote measurement of automobile emission CO and CO<sub>2</sub> by none-dispersion infrared absorption method [J]. *Chinese Journal of Quantum*, 2003, 20(4): 459-464. (in Chinese)  
丁蕾,刘文清,张玉钧,等. 机动车尾气 CO 和 CO<sub>2</sub> 非分光红外遥测技术研究 [J]. *量子电子学报*, 2003, 20(4):459-464.
- [6] Chen Xiaoning, Liu Jianguo, Si Fuqi, et al. CO detection system with non-dispersed infrared absorbance technique [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 207-210. (in Chinese)  
陈晓宁,刘建国,司福祺,等. 非分散红外 CO 气体检测系统研究 [J]. *大气与环境光学报*, 2007, 2(3): 207-210.
- [7] Si Fuqi, Liu Jianguo, Liu Wenqing, 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)  
司福祺, 刘建国, 刘文清, 等. 基于气体滤波相关技术的非分散红外 CO 气体检测系统研究 [J]. 量子电子学报, 2004, 21(4): 425-428.
- [8] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 1982: 258-271. (in Chinese)  
赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982: 258-271.
- [9] Fang Jing, Liu Wenqing, Zhang Tianshu. A line by line trace gas absorption model and its application in NDIR Gas detection technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(6): 1269-1272. (in Chinese)  
方静, 刘文清, 张天舒. 逐线积分气体吸收模型及其在 NDIR 气体检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(6): 1269-1272.
- [10] Rich Wolleswinkel, De Meern. Method for extending usage life span of infrared lighth sources for non-dispersive infrared (NDIR) gas sensing technology: US Pat US/2007/0267568A1[P]. 2007-11-22.
- [11] Andre Galais, Gerard Fortunato, Pierre Chavel. Gas concentration measurement by spectral correlation: rejection of interferent species [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(14): 2127-2134.
- [12] Lesial Tyson, Yong -Chien Ling, Charles K Mann. Simultaneous multicomponent quantitative analysis by infrared absorption spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy*, 1984, 38(5): 663-668.
- [13] Shu Zhifeng, Xu Wenjing, Tang Lei, et al. Development of wind lidar based on Rayleigh scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2153-2157. (in Chinese)  
舒志峰, 徐文静, 唐磊, 等. 基于瑞利散射的测风激光雷达研制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2153-2157.
- [14] Sun Youwen, Xue Ruili, Liu Chunyu, et al. Design of a new type of all-fiber isolator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2187-2190. (in Chinese)  
孙友文, 薛瑞丽, 柳春郁, 等. 一种新型全光纤隔离器的设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2187-2190.
- [15] Wang Lingfang, Wen Zhiyu. Gas sensing system based on pulse DFB-MIR quantum cascade laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2147-2152. (in Chinese)  
王玲芳, 温志瑜. 脉冲式 DFB 中红外量子级联激光器的气体检测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2147-2152.

## 下期预览

# 基于接触方法与集成仿真技术的摆镜面形仿真

徐广州, 阮萍, 李婷, 李福, 卢笛

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要:**为考察所设计摆镜在外载作用下面形变化是否满足设计要求, 研究摆镜在螺钉预紧力和不同方向重力作用下摆镜面形变化规律, 使用接触非线性有限元方法对摆镜进行了仿真, 采用基于 Zernike 多项式的数据处理算法对面形数据进行了处理, 得到消除刚体位移后表征实际面形变化的参数和表示刚体位移系数的分布曲线。结果表明螺钉预紧力和不同方向重力作用下摆镜刚体位移明显, 镜面平移占据了刚体位移的主要方面, 基于集成仿真技术的面形处理算法可以有效消除刚体位移, 预紧力存在、不同方向重力作用下摆镜面形影响略有不同, 与预紧力相比重力作用对面形影响较小。预紧力作用下摆镜面形仿真数据对于摆镜设计、装调具有一定指导意义, 也说明基于接触方法面形仿真的工程适用性。