

雾霾对基于弹光调制检测系统的影响

李妍¹, 王太勇^{2*}, 胡森³

1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室, 天津 300072

2. 天津市数控系统技术工程中心, 天津 300072

3. 凌云工业股份有限公司研发中心, 河北 涿州 072761

摘要 近几年我国的雾霾日趋严重, 不但对人的健康造成危害、对空中交通造成安全隐患, 同时也对很多应用于户外的光学设备造成了影响。为了定量分析不同雾霾等级对基于弹光调制痕量气体浓度检测系统性能的影响, 设计了一种测试系统, 定量比较了在同一系统中不同PM_{2.5}浓度条件下对等量VOC气体浓度反演的影响。实验中实地采集不同PM_{2.5}浓度的样气, 再分别与标准待测气体混合, 最终通过对透射光谱变化和待测气体浓度反演数据的比较, 定量分析PM_{2.5}浓度对系统的影响。实验中选用甲醛和苯作为待测气体, 分别配制了六种浓度的待测气体, 对6个雾霾浓度等级(No. 1—No. 6)分别进行了测试。实验结果显示, 当PM_{2.5}浓度增大时, 系统光能吸收率降低。当PM_{2.5}浓度等级小于No. 3时, 衰减变化相对缓慢, 而大于No. 3后衰减效果明显增强。当PM_{2.5}浓度小于 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 测试精度优于90%; 当PM_{2.5}浓度超过 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 对VOC浓度反演的影响变强, 当达到 $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 测试误差将近30%。由此可见, PM_{2.5}浓度对弹光调制系统的气体浓度检测具有显著影响。

关键词 弹光调制系统; 雾霾; PM_{2.5}; 痕量气体; 衰减

中图分类号: TN926

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)02-0392-05

引言

雾霾由雾和霾两部分构成, 雾指浮游在空气中的微小水滴; 霾亦叫灰霾, 指浮游在空气中的极细微干尘粒。一般情况下, 采用PM_{2.5}和PM₁₀等大气成分指标对其等级分类。近年来, 雾霾现象在全国诸多省份出现并且越演越烈, 其中以北方地区更为频繁, 严重影响空气质量、交通出行等, 受到国家的高度重视。国内外学者开展了雾霾成因、影响、光学特性等方面的大量研究。

弹光调制是利用双折射现象控制光谱变化的一种手段, 其在痕量气体浓度检测中被广泛应用。例如, 美国BUICAN集团^[14-15]研究的生化战剂实时监测系统, 采用全景成像干涉的方式对大气窗口 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的光谱进行数据分析, 最小光谱分辨率优于 4.80 cm^{-1} 。天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室曾采用调光调制实现了对室内VOC气体的浓度检测, 可同时区分三种常见VOC气体的浓度, 精度优于5.0%^[14-15]。中北大学王志斌教授等人对弹光调制型成像

光谱技术进行了深入的研究, 对光谱数据的处理与重建方法提出了许多新的思路^[14-15]。

从实际应用的角度出发, 弹光调制在痕量气体浓度检测领域的发展空间还很大, 例如户外大型输气管泄漏遥测、区域特种污染气体监测等。而雾霾的出现势必对系统检测能力产生影响, 限制该技术在实际应用中作用的发挥。研究雾霾对弹光调制系统回波光谱的影响、量化分析不同条件下光谱受干扰的程度以及提出相应的标定与校正的手段成为了一个十分重要的研究方向。本工作的主要研究内容是在不同雾霾等级下对几种待测气体进行浓度反演, 并与非雾霾条件下进行对比实验, 同时提出修正模型及对修正后数据进行分析。

1 弹光调制系统

基于弹光调制的气体浓度检测系统如图1所示, 整个系统主要分为两部分: 弹光调制部分及气体检测部分。(1)弹光调制部分包括光可变衰减器、起偏器、弹光调制晶体、检偏器、探测器等。其中, 光可变衰减器用于调节测试光强,

收稿日期: 2017-04-06, 修订日期: 2017-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475324)资助

作者简介: 李妍, 女, 1982年生, 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室博士研究生

e-mail: liyannuc@sina.com

* 通讯联系人 e-mail: tywang@tju.edu.cn

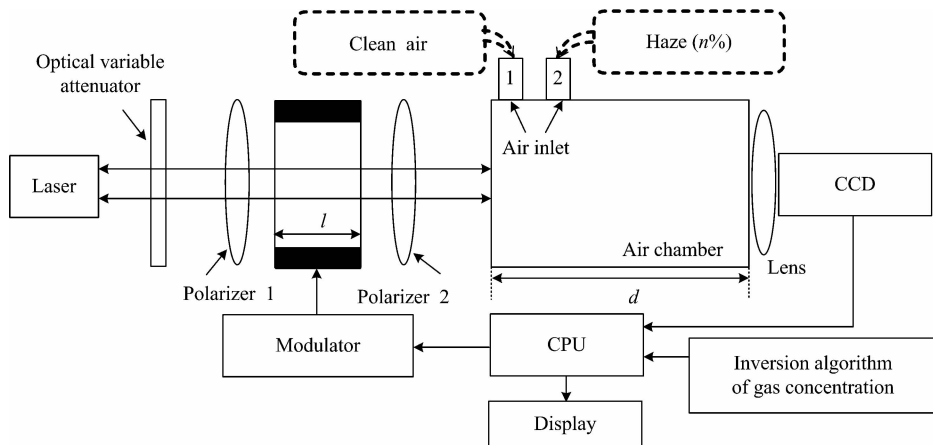


图 1 弹光调制型气体浓度检测系统

Fig. 1 Gas concentration detection system based on photoelastic-modulator

避免信号饱和；弹光晶体实现对光谱振幅与相位的调制，达到获取待测气体特征吸收峰位置准确参数的目的。(2) 气体检测部分包括气室及入气口切换装置、气体光谱反演算法等。其中，测试过程中首先测试洁净空气中待测气体的浓度，然后换成污染等级已知的雾霾空气对相同浓度的待测气体进行测试，观察其测试光谱数据及对浓度反演的影响。

调制晶体的有效长度为 l ， o 光与 e 光的折射率之差为 Δn ，则其光程差为 $L = l \cdot \Delta n$ ， ω 为调制角频率。则相位差有

$$\delta = \delta_0(c) \sin(\omega t - \phi_0) \quad (1)$$

式中， c 为波数， ϕ_0 为初始相位， $\delta(\sigma)$ 为调制晶体的最大光程差 ($\delta(\sigma) = 2\pi L_0 \sigma$)，经弹光调制后干涉信号可表示为

$$I_{out}(t) = \int_0^\infty I_{in}(\sigma) \cos(\delta) d\sigma \quad (2)$$

调制过程中，调制角频率的变化可写成

$$\omega = \pi \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)L^2}} \quad (3)$$

式中， ρ 是调制晶体的密度， σ 是泊松比， E 是杨氏模量。

被调制后的光穿过气室后，照射在 CCD 上，其干涉条纹强度有

$$I = 2 | \vec{E}_0 |^2 | r |^2 [1 + \cos(2\pi\delta x)] \quad (4)$$

式中， \vec{E}_0 为初始电矢量， r 为反射系数。则经傅氏逆变换可得光强随波长的函数

$$B(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \cos(2\pi x \delta) dx \quad (5)$$

式中， x 表示光轴方向上长度 l 上的任意位置。

对于有效吸收长度为 d 的气室而言，依据比尔朗伯定律待测气体浓度 c 有

$$c = \frac{1}{\alpha(\lambda_i)d} \ln\left(\frac{I(\lambda_i)}{KI_0}\right) \quad (6)$$

式中， K 为系数， I 为光强 [由式(4)得到]， d 为气室长度， λ_i 为特征波长值， $\alpha(\lambda_i)$ 为 λ_i 处吸收系数。

由此可见，通过以上对光强与位置、调制强度等的函数关系，可以准确地计算任意特征波长上的幅值与相位，与此同时结合式(6)就能求解出待测气体的准确浓度。因为系统为宽光谱，所以只要调制光谱分布合适，即可利用反演算法同时获取多种气体的浓度信息。

2 雾霾量化测试及实验定标依据

2.1 雾霾测试与结果选取

为了准确地量化雾霾对气体浓度检测的影响，首先要选择一个稳定的测试环境，采用精度量级更高的设备对其标定。测试位置为中国气象局天津观测站 54517 号 (距天津南城区快速路约 0.3 km)，采用美国 TEOM 系列的 RP1400a 型监测系统对 PM2.5 进行检测，其测试范围为 $0 \sim 1\ 500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，精度为 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。分别选取雾霾强度不同的时间节点进行测试，从而分析不同雾霾等级对气体浓度测试的影响。选取测试时间、环境参数及 PM2.5 值如表 1 所示。

表 1 测试值及其环境参数表

Table 1 Test value and its environmental parameters

No.	Concentration of PM 2.5 / ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Wind speed / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Relative humidity / %	Observation date
1	20	18.3	1.3	63	Mar. 02
2	87	21.4	1.4	57	Feb. 27
3	124	16.7	0.9	61	Mar. 14
4	178	18.9	1.2	54	Apr. 04
5	249	20.4	1.1	60	Mar. 23
6	397	21.2	1.4	62	Apr. 19

由表 1 可知, PM_{2.5}浓度选取是按照在每个污染等级中分别选一个中间位置的数据代表的, 序号 1—6 分别对应了污染等级一级到六级(我国标准, PM_{2.5}指的是直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物, 也是本研究霾的主要粒径范围)。在符合 PM_{2.5}浓度分级选取的基础上, 还需要考虑温度、风速和相对湿度, 要求其测试环境尽量一致, 尤其是风速应尽可能小, 避免给测试带来较大的随机误差。该表采用的数据是在 2 月—4 月期间, 测试时段温度范围在 18.0~20.0 °C 内, 日均风速低于 1.5 m·s⁻¹, 相对湿度与月平均值差异低于 5% 的。

2.2 实验定标依据

将以上六种不同 PM_{2.5}浓度的样气与标准洁净空气分别引入弹光调制系统的气室中, 并对某一种痕量气体进行浓度检测, 就能有效地反映雾霾等级对该种气体浓度检测的影响效果。基于此思路, 实验过程中主要设计两个重要参数的标定问题。其一是对吸收光谱特征位置的标定, 其二是对待测 VOC 气体浓度值的标定。特征光谱位置是否准确不但影响气体浓度的反演, 同时还反映了雾霾等级对光谱分布的作用效果, 所以需要明确的获得不同条件下光谱分布形态, 采用 ARCSpectro 型光谱仪对光谱分布进行标定; VOC 气体浓度采用 PTM500-VOC 型气体分析仪进行定标, 用于与系统测试结果作对比。

3 实验部分

3.1 条件

系统采用上海昊量公司的可调谐型激光器, Union Optic 公司生产的起偏器和检偏器, 弹光晶体材料为硒化锌, 尺寸为 15 mm×15 mm×10 mm, 驱动频率为 100 kHz, 驱动电压为 ±25 V。待测 VOC 选择标准样气的甲醛和苯, 调配浓度分别为 10, 20, 50, 100, 200 和 500 μg·m⁻³, 标准样气调配精度优于 1.0 μg·m⁻³。将以上待测样气与 2.1 中的六种不同 PM_{2.5}浓度气体与洁净空气分别混合进行测试, 并对其得到的光谱分布和气体浓度测试数据进行分析。采集不同等级的雾霾是在不同日期进行的(日期标注在测试数据表中), 当采集完成后直接将采集气体作为参考气体对不同浓度的甲醛和苯进行测试, 目的是保证采集的雾霾浓度确定, 避免存放下过程导致的雾霾沉降, 降低测试精度。

3.2 光谱测试结果与分析

对于光谱测试而言, 主要是分析在不同 PM_{2.5}浓度条件下, 被测气体特征波长位置上的光谱振幅强度的变化情况。以洁净空气中测试得到的光谱振幅强度作为标准值, 对其他条件下的光谱振幅强度做归一化处理, 得到其影响程度, 甲醛和苯的实验结果如图 2 所示。

如图 2 所示, 随着 PM_{2.5}浓度等级的提高, 甲醛和苯的吸收能力逐步降低, 但可以看出吸收峰峰值基本没有发生偏移, 所以可知, 当 PM_{2.5}浓度增大时, 主要对系统光能吸收率产生明显影响。同时, 整个变化过程非线性, 在小于 No. 3 以前, 衰减变化相对缓慢, 而大于 No. 3 以后的衰减效果明显增强。通过两幅数据图的比较可知, 虽然不同波长位置的

衰减强度不同, 但是两组数据均体现了雾霾浓度增大导致测试值偏低的趋势。在本工作中, 雾霾样气为天津地区样气, 测试结果针对天津地区而言, 但根据其工作机理笔者认为即使是不同类型的雾霾, 其成分有所不同, 但微粒粒径尺寸仍满足 ≤2.5 μm, 则具有一定的普适性, 但具体地区的雾霾导致的测试递减程度可能不尽相同。

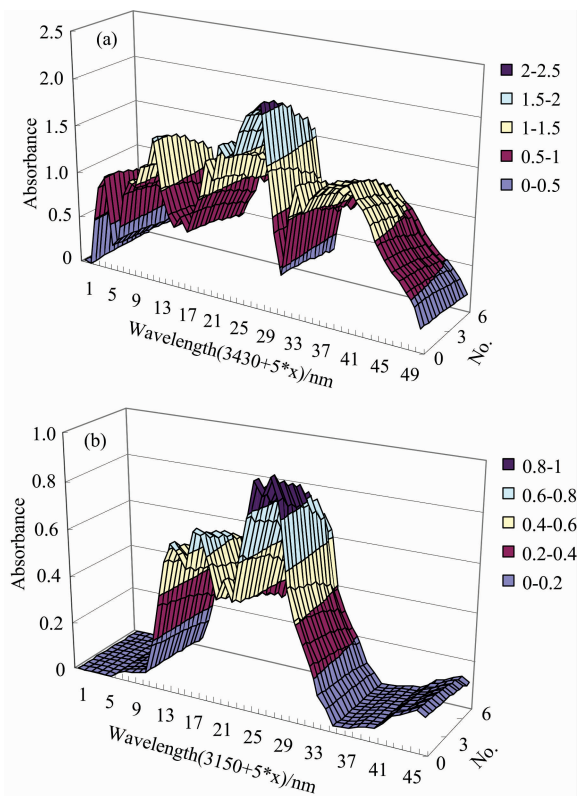


图 2 甲醛与苯吸收光谱系数随雾霾浓度变化关系
(a): 甲醛; (b): 苯

Fig. 2 The absorption coefficient of formaldehyde and benzene versus haze level

(a): Formaldehyde; (b): Benzene

3.3 VOC 浓度反演结果分析

不同 PM_{2.5}浓度条件下对几种典型标准含量样气进行测试, 实验结果如表 2, 表 3 所示。

由表 2 和表 3 的实验数据可知, 当采用洁净空气测试时, 标准 VOC 检测设备与本系统对六种不同浓度的标准样气的测试结果与真值接近, 平均误差小于 2%。随着 PM_{2.5}浓度的不断增大, 测试数据的偏差越来越明显, 并且其测试结果均是趋于变小, 分析认为 PM_{2.5}浓度增大造成光吸收和散射效果加剧, 虽通过相等长度的气室但其能量受到衰减, 故测试数据出现整体偏小的现象。整体数据分布: 在小于 150 μg·m⁻³ 以内, 测试精度可以保证在 90% 以上; 当超过 150 μg·m⁻³ 以外时, PM_{2.5}浓度对 VOC 浓度反演的影响变强, 当达到 350 μg·m⁻³ 时, 测试误差将近 30%, 由此可见, PM_{2.5}浓度对弹光调制系统的气体浓度检测具有显著影响。由此表数据可以看出与图 2 和图 3 所示的变化趋势相近, 均反映了系统对不同雾霾等级下甲醛和苯测试的变化趋势。

表 2 甲醛与苯的浓度测试数据表
Table 2 Concentration test data of formaldehyde and benzene

No.	Concentration of formaldehyde/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)					
	10		20		50	
	PTM500	The system	PTM500	The system	PTM500	The system
0	10.1	9.6	19.7	20.1	49.7	49.4
1	9.8	9.4	18.9	19.1	45.6	45.4
2	9.6	9.3	17.8	18.2	42.8	43.1
3	9.1	9.0	17.4	17.6	41.6	42.1
4	8.7	8.6	16.5	16.8	40.4	41.0
5	8.4	8.5	16.3	16.1	39.5	39.8
6	7.3	7.8	14.7	14.5	36.2	36.5
No.	100		200		500	
	PTM500	The system	PTM500	The system	PTM500	The system
	101.0	98.5	199.1	198.2	498.5	503.1
1	95.2	94.3	192.7	193.4	477.3	479.5
2	93.5	92.4	189.8	190.7	472.6	475.3
3	91.6	90.7	185.3	184.6	459.2	462.1
4	86.4	88.2	176.1	178.3	431.1	430.5
5	83.5	81.3	153.5	153.4	415.0	412.8
6	75.8	74.2	147.2	148.1	368.7	359.4

Note: No. 0 represents clean air and No. 1—No. 6 are the same as those in table 1 (the same below)

表 3 甲醛与苯的浓度测试数据表
Table 3 Concentration test data of formaldehyde and benzene

No.	Concentration of formaldehyde/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)					
	10		20		50	
	PTM500	The system	PTM500	The system	PTM500	The system
0	10.1	9.6	19.7	20.1	49.7	49.4
1	9.8	9.4	18.9	19.1	45.6	45.4
2	9.6	9.3	17.8	18.2	42.8	43.1
3	9.1	9.0	17.4	17.6	41.6	42.1
4	8.7	8.6	16.5	16.8	40.4	41.0
5	8.4	8.5	16.3	16.1	39.5	39.8
6	7.3	7.8	14.7	14.5	36.2	36.5
No.	100		200		500	
	PTM500	The system	PTM500	The system	PTM500	The system
	101.0	98.5	199.1	198.2	498.5	503.1
1	95.2	94.3	192.7	193.4	477.3	479.5
2	93.5	92.4	189.8	190.7	472.6	475.3
3	91.6	90.7	185.3	184.6	459.2	462.1
4	86.4	88.2	176.1	178.3	431.1	430.5
5	83.5	81.3	153.5	153.4	415.0	412.8
6	75.8	74.2	147.2	148.1	368.7	359.4

4 结 论

研究了在弹光调制系统中雾霾等级(PM_{2.5}浓度)对痕量气体浓度检测性能的影响,并且定量分析及实验测试了不同PM_{2.5}浓度下两种VOC气体吸收光谱系数的变化关系。最

终,通过实验对六种浓度的待测气体,对6个雾霾浓度等级(No.1—No.6)分别进行了测试。结果显示当PM_{2.5}浓度增大时,对系统光能吸收率具有明显影响。当PM_{2.5}浓度小于150 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,测试精度在90%以上;当PM_{2.5}浓度大于150 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,其对VOC浓度反演的影响变强,当达到350 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,测试误差将近30%。

References

- [1] WANG Shuang, WANG Zhi-bin, ZHANG Min-juan(王 爽, 王志斌, 张敏娟). Acta Optica Sinica(光学学报), 2017, 36(3): 0326001.
- [2] Zhao Pusheng, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng, et al. Atmos. Res., 2011, 101(3): 711.
- [3] LI Xiao-lu, JIANG Yue-song(李小路, 江月松). Science in China(Series E: Information Sciences)(中国科学 E 辑: 技术科学), 2006, 11: 105.
- [4] Gao Jian, Chai Fahe, Wang Tao, et al. J. Environ. Sci., 2012, 24(1): 14.
- [5] Wu Zhijun, Hu Min, Yue Dingli, et al. Science China Earth Sciences, 2011, 54(11): 1772.
- [6] Sasaki Y, Kobayashi J, Yagi S, et al. Electronics Letters, 2014, 50(21): 1540.
- [7] Chong S S, Chong W Y, Harun S W, et al. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 821.
- [8] ZOU Jie-shu, WANG Fei, YAN Jian-hua(邹捷书, 王 飞, 严建华). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(12): 3830.
- [9] Letu H, Nagao T M, Nakajima T Y, et al. Applied Optics, 2014, 53(31): 7523.
- [10] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6: 989.
- [11] Firby C J, Elezzabi A Y. Applied Physics Letters, 2016, 108(5): 051111.
- [12] Ye C, Liu K, Soref R A, et al. Nanophotonics, 2015, 4(1): 261.

Research on the Influence of Haze for Detection System Based on Elastic Light Modulator

LI Yan¹, WANG Tai-yong^{2*}, HU Miao³

1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China
2. Tianjin Engineering Research of CNC Technology, Tianjin 300072, China
3. Lingyun Industrial Corporation Limited Research and Development Center, Zhuozhou 072761, China

Abstract In recent years, haze phenomenon is becoming more and more serious in China. It not only harms people's health and air traffic caused by security risks, but also affects a lot of optics equipment used outdoor. In order to quantitatively analyze the effect of different haze levels on the performance of the trace gas concentration detection system based on the elastic light modulator, the test system was designed. The effect of different PM_{2.5} concentration sample gas on the inversion of equivalent VOC gas concentration was quantitatively analyzed. In the experiment, different concentrations of PM_{2.5} were collected in the field, and then mixed with the standard gas to be prepared. Finally, the comparison of the transmitted light spectrum and the measured gas concentration inversion data was made. The effect of PM_{2.5} concentration on the system was quantitatively analyzed. In the experiment, formaldehyde and benzene were used as the gas to be measured. Six kinds of concentrations of the gas to be measured were prepared, and 6 haze concentration levels (from No. 1 to No. 6) were tested. The experimental results showed that when the PM_{2.5} concentration increases, the system light energy absorption rate is significantly reduced. When the PM_{2.5} concentration level is less than No. 3, the attenuation change is relatively slower, and when it is greater than No. 3, the attenuation effect is enhanced. When the PM_{2.5} concentration is less than 150 g · m⁻³, the test accuracy is better than 90%; When the concentration of PM_{2.5} exceeds 150 g · m⁻³, the effect of inversion of VOC concentration becomes stronger. When 350 g · m⁻³ is reached, the test error is nearly 30%. It can be seen that PM_{2.5} concentration has a significant effect on the gas concentration detection of the optical modulation system.

Keywords Elastic light modulator system; Haze; PM_{2.5}; Trace gas; Attenuation

(Received Apr. 6, 2017; accepted Oct. 8, 2017)

* Corresponding author