

基于大气中 PM_{2.5} 的粒度与质量浓度传感的测量装置

陈嘉珍, 唐昊, 李建洲, 王钰蕴, 吴治阳, 彭力, 邱健, 韩鹏

(华南师范大学, 广东广州 510006)

摘要: 本文主要设计了一种基于大气中 PM_{2.5} 的粒度与质量浓度传感的测量装置。利用雾化器产生的细水雾捕集大气中的细颗粒物, 并通过水幕循环收集已捕集颗粒物的液滴, 得到 PM_{2.5} 液态样品; 然后用动态光散射技术和石英晶体微天平质量检测技术实现对样品溶液粒度和质量浓度的在线测量, 并开展了相应的实验研究。测试结果表明, 这种 PM_{2.5} 采样以及检测的方法实用有效, 采样及检测效果优于传统仪器。

关键词: PM_{2.5}; 湿法采样; 动态光散射; 石英晶体微天平

Measurement device based on particle size and mass concentration sensing of PM_{2.5} in the atmosphere

Chen Jiazhen, Tang Hao, Li Jianzhou, Wang Yuyun, Wu Zhiyang, Peng Li, Qiu Jian, Han Peng

(South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper mainly designs a measuring device based on particle size and mass concentration sensing of PM_{2.5} in the atmosphere. The fine particles in the atmosphere were captured by the water mist produced by the nebulizer, and the droplets of the captured particles were collected by the water curtain circulation to obtain the PM_{2.5} liquid sample. Then the on-line measurement of particle size and mass concentration of sample solution is realized by dynamic light scattering technology and quartz crystal microbalance quality detection technology, and the corresponding experimental research is carried out. The test results show that this method of PM_{2.5} sampling and detection is practical and effective, and the sampling and detection effect is better than that of traditional instruments.

Keywords: PM_{2.5}; Wet sampling; Dynamic light scattering; Quartz crystal microbalance.

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

近年来,大气细颗粒物污染问题已经成为危害国家经济发展与环境和谐发展的主要障碍之一,其中对大气细颗粒物的监测和防治工作已近成为社会环境污染防治的热点以及各个国家环境保护和研究工作的重点。其中,无论是大气细颗粒物致病机理的研究,还是大气细颗粒物源解析(即通过分析大气颗粒物成分,追溯污染的来源,以便加强治理),都需要获得大气细颗粒物样品以及精准测量。所以,为了保证大气细颗粒物监测数据的准确性,提升对大气细颗粒物的捕集效率以及实现大气细颗粒物的在线粒度及质量监测就显得尤为重要。

1.2 应用价值

研制基于湿法采样技术大气细颗粒物采样器,满足了在环境监测过程中采集可应用于多种特征检测的大气细颗粒物样品的需求,该采样器可同时采集 $PM_{2.5}$ 中的颗粒物及微生物等成分,获得液态样品,可直接用于浓度、粒径、化学生物等组分的分析研究。动态光散射传感器和石英晶体微天平传感器,则解决了 $PM_{2.5}$ 的浓度及粒径的在线测量。可以用作环境监测中大气细颗粒物采样及监测的有效工具,解决大气细颗粒物采样器被国外垄断的弊端。

另外,通过对大气细颗粒物进行采样和监测,有助于进一步评估和控制颗粒物污染、空气传播的病原体、过敏原和毒素等对空气质量、人类健康和气候变化的影响。

2 创新点与优势

- a) 提出一种适用于多特征分析(浓度、粒度、化学成分、生物成分等分析)的 $PM_{2.5}$ 采样方法——湿法采样,并设计出大气细颗粒物湿法捕集系统,其中原材料为水,成本低且环保,整个采样系统无人工操作,避免外界干扰;
- b) 实验室自主研发了的多通道逻辑可编程器件相关器,达到 1 微秒级别的采样速率,可以进行长达 500 毫秒的相关运算,创新性地结合了串、并行相关器,用少量逻辑资源与存储资源实现多通道同时运算,在国内外硬件相关器领域处于领先地位;
- c) 自主研发了 QCM 质量浓度测量系统,采用超长门限的高精度频率测量技术,频率精度最低可达 0.1Hz,质量精度可 10ng,其灵敏度高于其他质量测量传感器;
- d) 以树莓派为上位机代替传统的 PC 进行反演算法的运算,用 LCD 触摸屏控制系统及显示相关数据,实现系统一体化,完成了大气颗粒物的捕集与在线测量功能。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

通常来说,关于细水雾捕获细颗粒的机理主要包括惯性碰撞、截留、重力沉降以及扩散。其原理图如图 1 所示,当带有细颗粒物的气流在流动的过程中遇到细水雾时,气流就会改变

流动轨迹，即如图 1 所示绕过物体流动。虽然气流中裹挟的细颗粒物会随着流动一起绕流过细水雾，但是其中的一些细颗粒物仍不可避免的与细水雾发生作用，也就是图中所展示的惯性碰撞和扩散、截留。

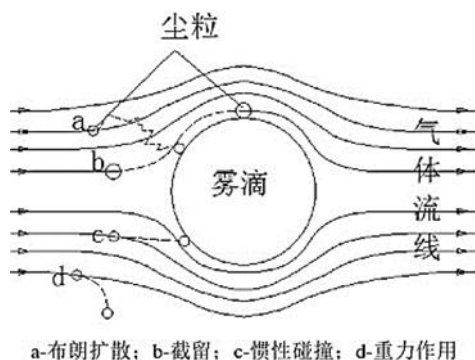


图 1 细颗粒物的湿法捕集原理示意图

3.2 设计方法

本仪器主要由采样系统、测量系统和控制系统组成。

a) 采样系统：大气切割器获得含有大气细颗粒物的气流，通过气泵输送到大气湿法采样捕集系统。在该系统中，利用流量计控制合适流量，将气流分为两路，一路进入雾化腔，其水量由非接触式自动水位器控制。同时另一路进入混合腔，使雾滴和颗粒充分混合，并通过水幕腔进行淋洗冲刷得到样品溶液。采样系统经过蠕动泵将捕集样品，输送至测量系统。

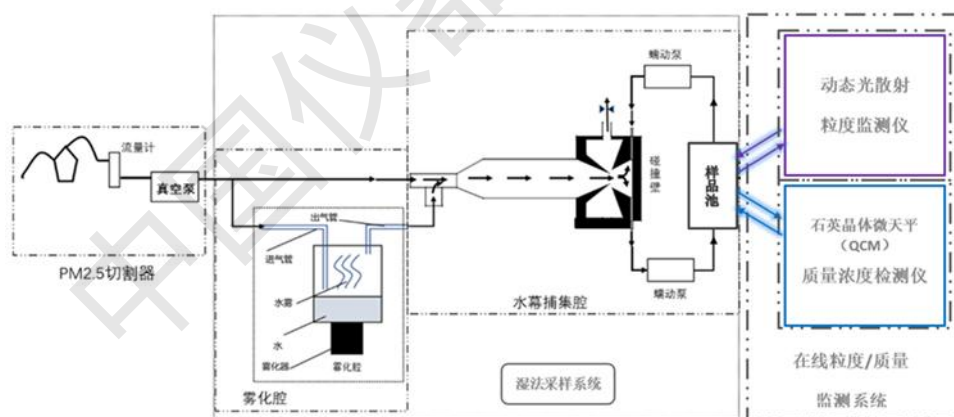
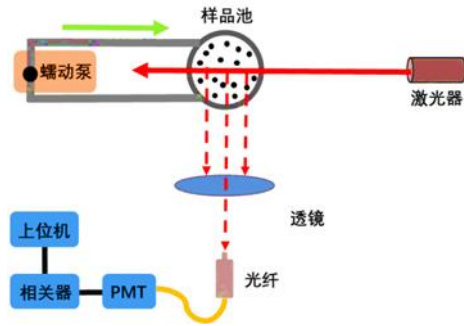
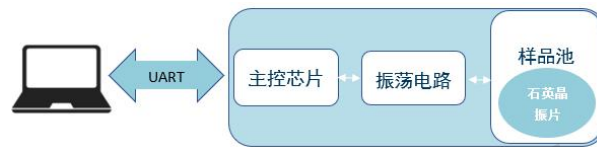


图 2 大气细颗粒物湿法采样与在线监测系统原理图

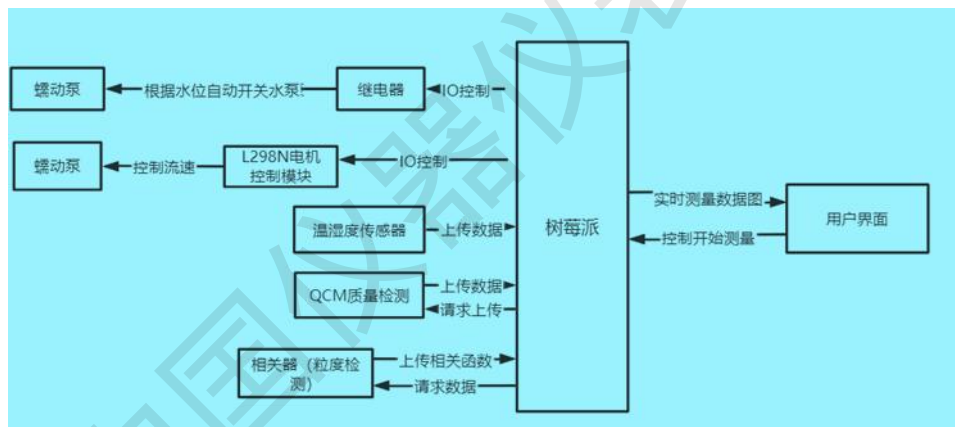
b) 粒度测量系统：基于传统动态光散射系统，半导体激光器发出稳定的高斯光束照到样品上，在固定散射角度下用光电倍增管接收样品的散射光，将散射光信号转换为电信号输入到相关器进行相关运算，通过树莓派上位机进行反演，显示屏及时反馈粒径信息。



c) 质量浓度测量系统：基于石英晶体微天平技术，样品溶液通入到样品池中，石英晶体将质量信息变化转换为频率信息变化，并将频率数据传输到上位机树莓派上。



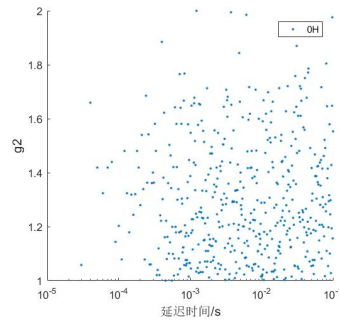
d) 控制系统：以树莓派 4B 为控制终端，通过 GPIO 口控制蠕动泵，驱动 DS18B20 温度传感器实现温度监测，利用串口通信，实现与硬件相关器的数据传输。通过 LCD 触摸屏显示基于 PyQt5 开发的 GUI 界面，并控制电路和显示实时数据与处理结果。



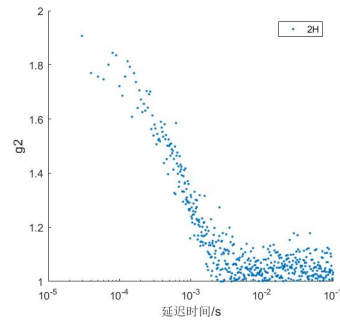
3.3 实验验证过程

3.3.1 在线粒度仪的实验研究

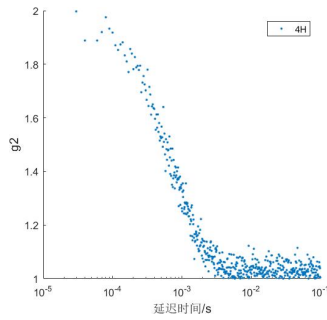
在同一样气流速下，随采样时间的增加，相关曲线发生的变化情况；接下来对比了相同的采样时间下，样气流速不同时，相关曲线的变化，如图 2。



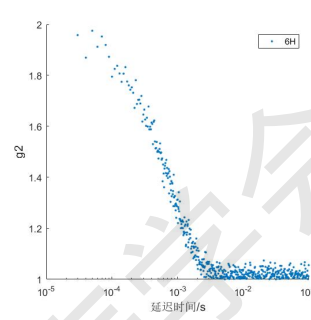
(a) 采样 0h 后的相关曲线



(b) 采样 2h 后的相关曲线



(c) 采样 4h 后的相关曲线

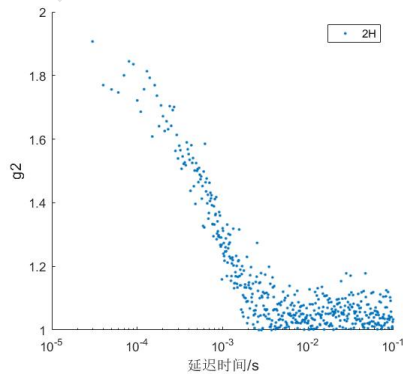


(d) 采样 6h 后的相关曲线

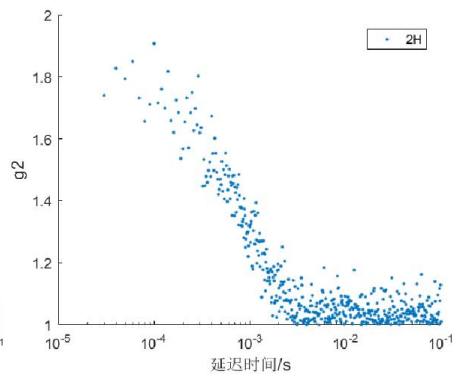
图 2 样气流速为 3L/min 时的相关曲线图

图 2 中是样气流速为 3L/min 时，归一化后得到的相关曲线。(a) 图为采样 0h 后的相关曲线，(b) 图为采样 2h 后的相关曲线，(c) 图为采样 4h 后的相关曲线，(d) 图为采样 6h 后的相关曲线。随着采样时间的增加，相关曲线由最初的杂乱无章逐渐变得更加集中和光滑，表明样品溶液中颗粒物浓度也越来越高，并且在样气流速为 5L/min、6L/min、9L/min 时，也有着相同的变化趋势。

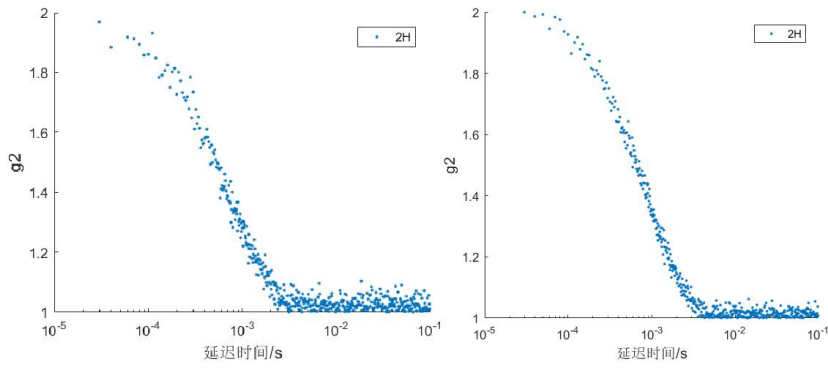
将采样时间相同而流速不同时测得的相关曲线数据进行比较，发现样气的进气流速的大小对相关曲线有着显著的影响。在 0h 时，样品池中没有颗粒物，所以不同流速下的归一化曲线均非常分散（如上图 a 所示），不具有对比性，所以不予考虑。但在 1h-6h 时，不同时刻下的归一化相关曲线的变化趋势一致，以采样时间为 2h 为例，得到如下图所示。



(a) 流速为 3L/min



(b) 流速为 5L/min



(c) 流速为 6L/min

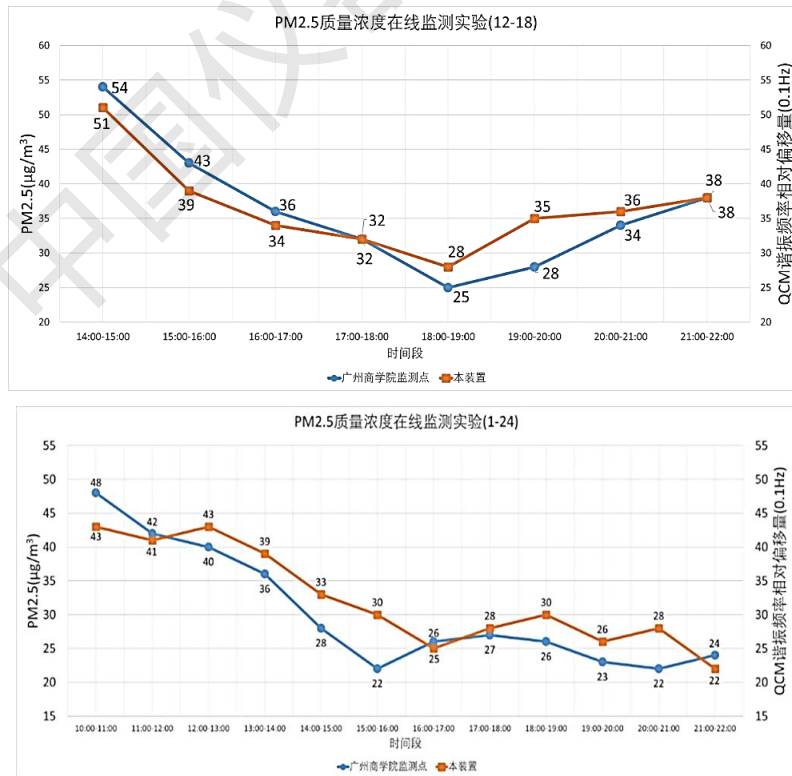
(d) 流速为 9L/min

图 3 不同流速下相关曲线变化图

图 3 中是大气采样实验为 2h 时归一化相关曲线图。(a) 是样气进气流速为 3L/min 时的相关曲线，(b) 是样气进气流速为 5L/min 时的相关曲线，(c) 是样气进气流速为 6L/min 时的相关曲线，(d) 是样气进气流速为 9L/min 时的相关曲线。实验结果表明：样气的进气流速的大小对相关曲线有着显著的影响。当样气的进气流速较低时，相关曲线质量比较差，曲线比较分散、粗糙（如图 3-a），当进气流速较大时，测得的相关曲线更为平滑、集中（如图 3-d），这样反演出的粒径结果也更加可靠。

3.3.2 QCM 质量检测仪的实验研究

如图 4，根据 QCM 质量监测实验数据和广州商学院所测数据对比图可知，虽然 PM_{2.5} 质量浓度和标准值有稍许差距，但总体趋势和误差在可接受范围内，这样通过 QCM 得出的质量浓度数据是可靠的。



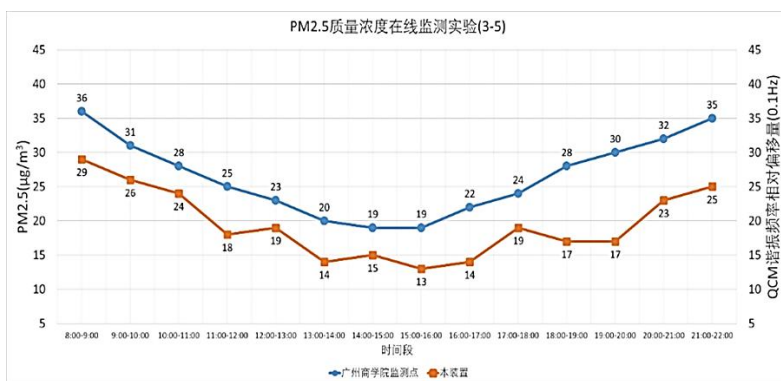


图4 广州商学院监测点数据 及 QCM 在线监测数据对比图

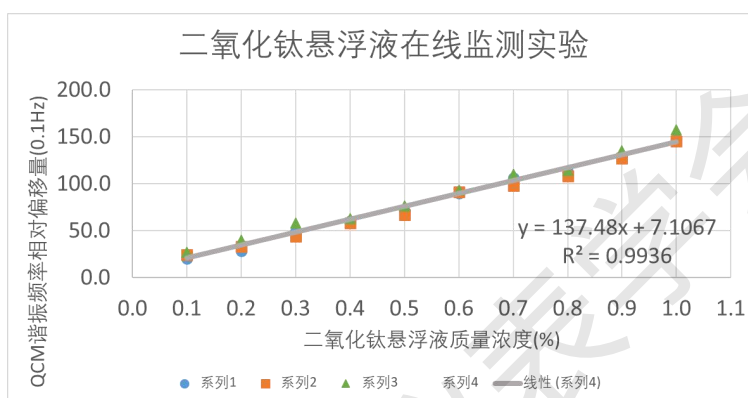


图5 QCM 实时监测二氧化钛悬浮液

如图5所示,通过多次测量不同浓度的二氧化钛悬浮液,得出精度为0.1Hz的频率偏移测量结果,进而根据线性拟合得到测量精度,测量精度为10ng/μL,由此可知QCM精度是很高的。

参考文献:

- [1] 孟祥彪,彭力,邱健,等.大气PM_{2.5}颗粒湿法捕集技术研究[J].中国粉体技术,2020,26(02):75-79.
- [2] 韩鹏,刘美娇,彭力,等.一种大气颗粒物连续分级湿法采样装置[P].广东省:CN113310754A,2021-08-27.
- [3] 邱健,陈庭江,彭力,等.高精度测量与数据高速传输的多通道PM_{2.5}检测装置和方法[P].广东省:CN114544449A,2022-05-27.
- [4] Chelani A B. Estimating PM_{2.5} concentration from satellite derived aerosol optical depth and meteorological variables using a combination model[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(3):847-857.
- [5] Rodney J. Weber ,Douglas Orsini , Y. Daun and Y.-N. Lee ,P. J. Klotz , Fred J. Brechtel. A

Particle-into-Liquid Collector for Rapid Measurement of Aerosol Bulk Chemical Composition. *Aerosol Science and Technology*,2001,35: 718 – 727.

- [6] KIM H T, JUNG C H, OH S N, et al. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction [J]. *Environmental Engineering Science*, 2001, 18 (2) :125–136.
- [7] Igor V. Novosselov,Riley A. Gorder,Joseph A. Van Amberg, et al. Design and Performance of a Low-Cost Micro-Channel Aerosol Collector[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2014, 48: 822 - 830.
- [8] He M, Ichinose T, Kobayashi M, et al. Differences in allergic inflammatory responses between urban PM2.5 and fine particle derived from desert-dust in murine lungs[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2016,297:41-55.
- [9] Mainelis G, Masquelier D A, Willeke K, et al. Performance of a compact air-to-liquid aerosol collector with high concentration rate[J]. *Journal of Aerosol Science*,2006,37 (5) :645-657.
- [10] Naïma Gaudel and Denis Bémer and Fabien Gérardin. A parametric study of aerosol particle scavenging efficiency by spray droplets, *Journal of Aerosol Science*, 2022,159: 105843.
- [11] Simonetti G, Frasca D, Marcoccia M, et al. Multi-elemental analysis of particulate matter samples collected by a particle-into-liquid sampler[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018,9 (4) :747-754
- [12] 陈淼.纳米颗粒粒度动态光散射自适应测量技术[D].广州:华南师范大学,2017.
- [13] 杨瑶. 全散射法 PM2.5 粒径分布检测技术研究[D].中国计量学院,2016.
- [14] 邹春阳,王博伟,闫雪晴,等.石英晶体微天平 (QCM) 应用的研究进展[J].*浙江农林大学学报*,2020,37 (05) :1006-1013.
- [15] 陈达奇. 电磁激励的无线 QCM 传感器研究[D]. 浙江:浙江大学,2018.
- [16] Kim H T, Jung C H, Oh S N, et al. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction[J]. *Environmental engineering science*, 2001, 18 (2) : 125-136.
- [17] Licht W. *Air pollution control engineering: Basic calculations for particulate collection*[M]. CRC Press, 1988.
- [18] Jung C H, Lee K W. Filtration of fine particles by multiple liquid droplet and gas bubble systems[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1998, 29 (5) : 389-401.

- [19] Jung C H, Lee K W. Filtration of fine particles by multiple liquid droplet and gas bubble systems[J]. Aerosol Science and Technology, 1998, 29 (5) : 389-401.
- [20] 朱卯. 石英晶体微天平振荡电路的设计及其耗散因子 D 的测量与分析[D]. 天津:南开大学,2014. DOI:10.7666/d.Y2699373.

中国仪器仪表学会