

# 基于压电谐振频率的 PM2.5 监测系统

谢建宏<sup>1</sup>, 胡兆吉<sup>2</sup>

(1. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学 资源环境与化工学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 基于压电谐振频率法采用模块化设计思想, 设计了压电谐振式 PM2.5 监测系统, 对系统的采样单元、谐振单元、频率测试与显示单元、控制单元等部件进行设计, 并对系统进行集成与性能评价。为实现对 PM2.5 颗粒物的有效采样, 并减小温度等环境因素对压电晶体检测性能的影响, 系统采用惯性冲击式分粒原理结合静电沉降的采样方案, 以 2 个相同的石英晶体振荡电路来构建双石英晶体谐振器, 建立压电谐振频率与压电晶片质量间的关系, 实现根据压电谐振频率的变化来确定 PM2.5 的质量浓度。系统测试结果表明, PM2.5 测试数据与官方公布的数据相近, 数据变化趋势一致。该 PM2.5 监测系统能反映被测区域 PM2.5 质量浓度的变化情况, 满足 PM2.5 监测需求。

**关键词:** 压电谐振频率; PM2.5 监测; 惯性冲击式分粒原理; 静电沉降; 双石英晶体谐振器

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.020

## PM2.5 Monitoring System Based on Piezoelectric Resonant Frequency

XIE Jianhong<sup>1</sup>, HU Zhaoji<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Resources Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Based on piezoelectric resonant frequency method, a piezoelectric resonant PM2.5 monitoring system is designed with the modular design concept. The sampling unit, resonant unit, frequency test and display unit, control unit and other components of the system are designed, and the integration and performance evaluation of the system are carried out. For this system, the sampling scheme of inertial impact particle principle integrated with electrostatic precipitation is adopted to realize the effective sampling of PM2.5 particles and reduce the effect of the environmental factor on the piezoelectric crystal detection performance. Two identical quartz crystal oscillator circuits are used to construct a dual quartz crystal resonator, and the relationship between the piezoelectric resonant frequency and the piezoelectric wafer quality is established, and the mass concentration of PM2.5 is determined based on the change of the piezoelectric resonant frequency. The system test results show that the PM2.5 test data are close to the official standard data, and the trend of data changes is consistent. The PM2.5 monitoring system can reflect the change of PM2.5 mass concentration in the measured area and meet PM2.5 monitoring requirements.

**Key words:** piezoelectric resonant frequency; PM2.5 monitoring; inertial impact particle principle; electrostatic precipitation; double quartz crystal resonator

## 0 引言

PM2.5 是指粒径小于  $\varnothing 2.5 \mu\text{m}$  的细颗粒物, 即为可入肺颗粒物。目前, PM2.5 已成为国内、外城市大气的首要污染物。对 PM2.5 颗粒物进行监测、评价与分析, 可为降低 PM2.5 对健康和生态的影响提供指导。采取有针对性的措施最大限度地减轻 PM2.5 的不利影响, 已成为环境监测领域特别关

注的问题。对 PM2.5 监测的研究, 国外许多国家的研究工作开展得较早。中国在气溶胶细粒子研究方面起步较晚, 近年来, 在 PM2.5 方面的研究工作越来越受到重视<sup>[1]</sup>。

对 PM2.5 浓度的测定涉及两个步骤:

- 1) 分离 PM2.5 与较大的颗粒物。
- 2) 测定分离出来的 PM2.5 的质量。

收稿日期: 2017-10-05

基金项目: 江西省科技支撑计划基金资助项目(20141BBG70006); 江西省教育厅科技计划基金资助项目(GJJ14163)

作者简介: 谢建宏(1971-), 男, 江西高安人, 教授, 博士, 主要从事测控技术与智能仪器的研究。

关于 PM2.5 的分离,国内、外分离 PM2.5 的方法基本一致,均由具有特殊结构的切割器及其产生的特定空气流速达到分离效果。对 PM2.5 质量的测定,目前国际上广泛采用的测定方法主要有质量法、 $\beta$ 射线吸收法和微量振荡天平法<sup>[2]</sup>。此外,还有压电晶振法<sup>[3]</sup>及光散射法等先进的光学检测方法与技术<sup>[4]</sup>。光散射法由于误差较大并具有不确定性,目前并未被各国环保部门采纳为标准方法。压电晶振法又称为压电晶振频差法,是基于压电元件谐振频率的变化来实现 PM2.5 质量浓度的测定,该方法灵敏度高,选择性好,装置相对简单等,已受到世界各国相关行业人士的重视,但颗粒物采集率不稳定,其灵敏度易受诸多因素影响,因此,设计性能稳定的压电谐振频率式 PM2.5 监测系统还有待进一步研究。

为提高采样的效率及其稳定性,本文采用惯性冲击式分粒原理结合静电沉降的采样方案,基于压电谐振参比频率法,设计 PM2.5 监测系统。对影响系统灵敏度的因素进行分析与研究,实现对 PM2.5 的连续采样及其质量浓度的实时准确监测。

### 1 系统结构

基于模块化设计思想设计了压电谐振式 PM2.5 监测系统,图 1 为系统的结构示意图。主要包括采样单元、谐振单元、频率测试与显示单元、控制单元等部件的设计,以及系统集成与性能评价等内容。

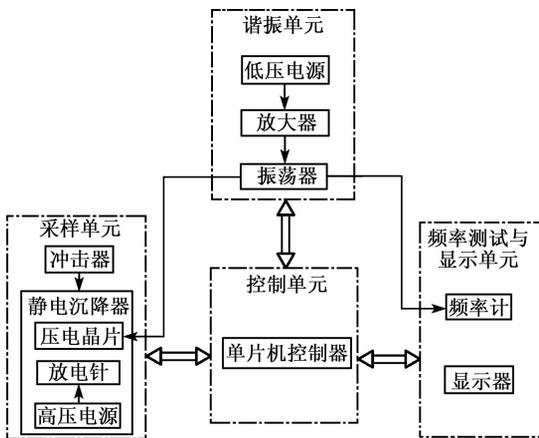


图 1 系统结构示意图

### 2 采样单元

基于惯性冲击式分粒原理(冲击器)结合静电沉降的采样方案,设计 PM2.5 采样器,实现对 PM2.5 颗粒物的有效采样。图 2 为系统采样单元(采样器)结构原理图。

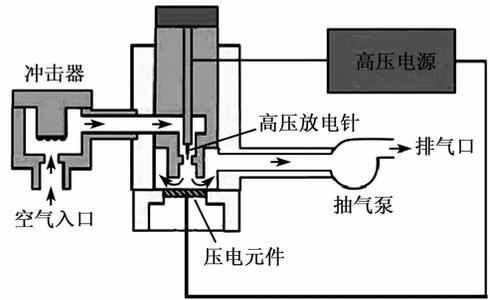


图 2 采样单元结构原理图

#### 2.1 冲击器

冲击器是一种以惯性冲击原理为基础,按照气溶胶颗粒的空气动力学直径的不同,对气溶胶颗粒进行分离采集的设备<sup>[5-6]</sup>。图 3 为冲击器的原理示意图。图中, $S$  为喷嘴与冲击板的间距, $H$  为喷嘴长度, $w$  为喷嘴孔径。颗粒随空气从喷嘴喷出后,由于受到冲击板的阻挡,空气发生急剧转弯。当气流发生转弯时,颗粒由于惯性作用,将保持原有的直线运动趋势,直到出射速度减小到 0 时才会停止,然后跟随气流继续偏转。1 个冲击器可把颗粒分为 2 个尺寸范围:大于一定粒径的颗粒被冲击板捕集,小于一定粒径的颗粒继续跟随气流运动。基于该原理,本文设计了  $w$  分别为  $\varnothing 7\text{ mm}$ 、 $\varnothing 5\text{ mm}$  的冲击器,可用于分别分离粒径小于  $\varnothing 10\text{ }\mu\text{m}$  及  $\varnothing 2.5\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒物。

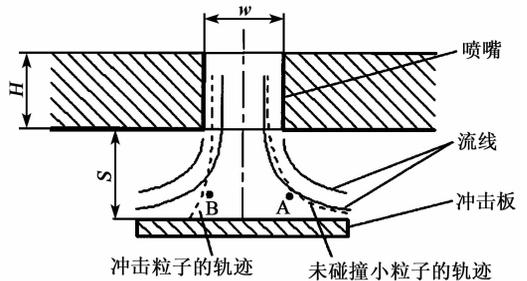


图 3 冲击器工作原理

#### 2.2 静电沉降器

静电沉降集尘<sup>[7]</sup>的工作原理是以高压直流电在两极间产生电晕放电,含气流通过两电极间电场时,颗粒物被强制荷电,荷电的颗粒在静电力的作用下向极性相反的极板(集尘极)运动并被极板所捕集,如图 4 所示。在对大气中可吸入颗粒物含量的检测研究中,本文将静电沉降集尘技术同质量敏感元件相结合,以质量敏感元件(本系统为压电石英晶片)作为集尘极,通过高压放电,使进入电场的可吸入颗粒物荷电,并在电场力的作用下向集尘极移动。本文设计的静电沉降器结构原理如图 2 所示。

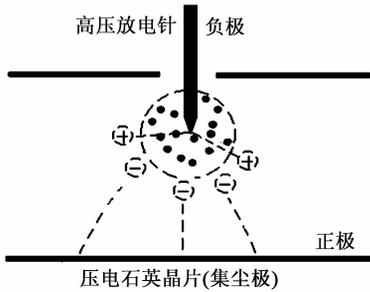


图4 静电沉降集尘原理

颗粒物的静电沉降采样中,其关联压电传感器灵敏度的静电沉降的效率受采样电压、两电极间的距离等因素的影响。为使PM2.5有效采样,以及使PM2.5检测中压电传感器的灵敏度处于最佳,本设计的静电沉降器结构参数为:高压放电针与石英晶片的间距约为7.0 mm,采样电压为3.0 kV。

### 3 谐振单元

基于石英晶体的正、逆压电效应,设计石英晶体谐振器,其构成原理如图5所示。本文对石英晶体谐振器的电源、放大器、石英晶片等主要部件进行设计。

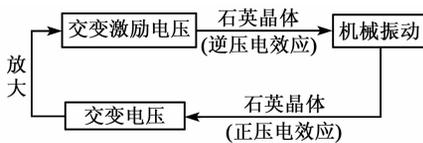


图5 石英晶体谐振器构成原理

在常压下,不同切型的石英晶体具有不同的振荡及温度特性,其中以AT-切型的晶体具有良好的温度特性,是石英晶体元件最常采用的切型<sup>[8-9]</sup>。AT-切型的石英晶体表面吸附的微小质量和其谐振频率偏移的关系式,即Sauerbrey方程<sup>[10-11]</sup>为

$$\Delta f = -2.27 \times 10^6 \times f^2 \times \Delta m / A \quad (1)$$

式中: $f$ 为石英晶体的基频; $\Delta m$ 为敷层即被测物质量; $A$ 为敷层面积; $\Delta f$ 为晶体谐振频率的变化量;负号表示质量的增加导致频率的下降。

式(1)表明,在假定外加质量均匀刚性地附着于晶片表面的条件下,晶片的谐振频率变化与外加质量成正比,利用这种特性可在微克级水平上测量物质的质量。

为实现对PM2.5微质量的测量,首先必须设计能关联微质量变化与固有频率变化的石英晶片及其振荡电路。为减小温度等环境因素对压电晶体检测性能的影响,采用2个相同的压电石英晶体振荡电路构成双石英晶体谐振器74LS00,其中一个振荡器作

为测量端,而另一个作为参考端。2个振荡器的输出分别输入差频器74LS132,经差频器得到差频信号,双石英晶体谐振检测单元设计框图如图6所示。采用的石英晶片如图7所示,该石英晶片采用AT-切型,晶体直径为 $\varnothing 13.7$  mm,频率为4.998 MHz。

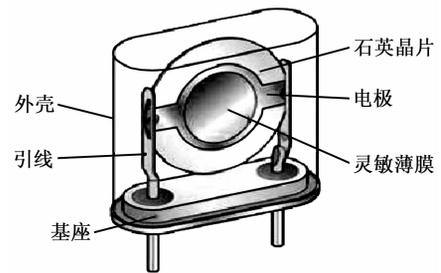
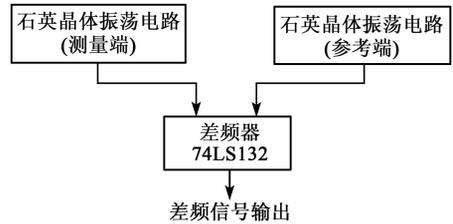
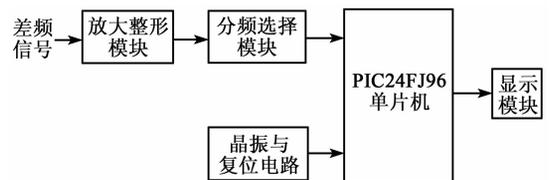


图7 石英晶片

### 4 频率测试与显示单元

基于双石英晶体谐振器,建立微质量与频率变化之间的关系,将谐振频率的变化量转换为质量的变化量,实现对PM2.5质量浓度的检测与显示,即为压电石英晶体谐振差频法测量PM2.5的工作原理。系统的频率测试与显示单元主要包括电源、微控制器、放大整形模块、分频选择模块、基准频率模块、显示模块等部件,其设计框图如图8所示。以实现频率的计数、PM2.5质量浓度的计算,以及结果的显示等功能。



### 5 系统集成与性能评价

基于对系统各单元的设计,将以上各单元进行有效集成,以实现系统的各项功能指标。系统以单片机PIC24FJ96为控制核心,实现对仪器系统各部件的协调控制、数据处理、显示等功能。

通过试验对设计的PM2.5监测系统性能进行测试,测试地点为南昌大学前湖校区附近,以距离南

昌大学前湖校区最近的南昌市新建区建工学校监测站点官方公布的监测数据作为标准数据进行对比,测试日期为2017-09-01至2017-09-20,测试对比结果如表1所示。结果表明,本系统测试数据与官方公布的标准数据相近,数据变化趋势一致。但由于

两测试地点的偏差,以及由于研究经费的限制致使本系统的测试分辨率( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )局限,故两者测试数据存在偏差。总之,该PM2.5监测系统能反映被测区域的PM2.5质量浓度的变化情况,能满足PM2.5监测需求。

表1 系统PM2.5测试数据与标准数据对比表

	质量浓度/ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$					
	09-01T 14:00:00	09-02T 8:00:00	09-03T 21:00:00	09-04T 00:00:00	09-04T 07:00:00	09-04T 22:00:00
新建区建工学校 (官方数据)	44	39	49	53	64	48
南昌大学前湖校区 (测试数据)	40	40	50	50	60	50
	质量浓度/ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$					
	09-06T 16:00:00	09-07T 10:00:00	09-07T 22:00:00	09-18T 23:00:00	09-19T 00:00:00	09-19T 16:00:00
新建区建工学校 (官方数据)	46	15	21	65	75	68
南昌大学前湖校区 (测试数据)	50	10	20	70	80	70

## 6 结束语

基于压电谐振频率法,设计了压电谐振式PM2.5监测系统,对系统的采样单元、谐振单元、频率测试与显示单元、控制单元等部件进行了设计,并对系统进行集成与性能评价。测试结果表明,系统PM2.5测试数据与官方公布的标准数据相近,数据变化趋势一致。该PM2.5监测系统能反映被测区域的PM2.5质量浓度的变化情况,能满足PM2.5监测需求,可为我国开展PM2.5环境管理提供技术支持。下一步需对该系统的测试分辨率进行提升研究,实现对PM2.5的微克级高精度测量。

## 参考文献:

- [1] 毛朔南,马宇明,蔡冶强,等. PM2.5检测标准及量值溯源方法现状及进展[J]. 中国计量,2013(4):22-24. MAO Shuonan, MA Yuming, CAI Yeqiang, et al. Current status and progress of PM2.5 detection standard and traceability method[J]. China Measurement, 2013(4):22-24.
- [2] 刘建国,桂华侨,谢品华,等. 大气灰霾监测技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报,2015,10(2):93-101. LIU Jianguo, GUI Huaqiao, XIE Pinhua, et al. Recent progress of atmospheric haze monitoring technology[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015,10(2):93-101.
- [3] ZHAO Jiuxuan, LIU Minliang, LIANG Liang, et al. Airborne particulate matter classification and concentration detection based on 3D printed virtual impactor and quartz crystal microbalance sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 238(2):379-388.
- [4] CAMBRA-LOPEZ M, WINKEL A, MOSQUERA J, et al. Comparison between light scattering and gravimetric samplers for PM10 mass concentration in poultry and pig houses[J]. Atmospheric Environment, 2015, 111:20-27.
- [5] 杜洪彬. 多级冲击式采样器的设计与应用研究[D]. 青岛:山东科技大学,2013.
- [6] 姜有光,杜亚江,谢韬. ZigBee技术在石油化工企业环境监测系统中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016(8):112-116.
- [7] 马静颖. 可吸入颗粒物的静电迁移行为及其理化特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2002.
- [8] ZHAO J, GAO R, LIU S, et al. A new sensitivity-improving method for piezoelectric resonance mass sensors through cantilever cross-section modification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3):1612-1621.
- [9] FAHRETTIN Y. Semiconducting and quartz microbalance (QCM) humidity sensor properties of  $\text{TiO}_2$  by Sol Gel calcination method[J]. Solid State Sciences, 2012, 14(6):673-676.
- [10] LATIF U, CAN S, HAYDEN O, et al. Sauerbrey and anti-Sauerbrey behavioral studies in QCM sensors—Detection of bioanalytes[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176(1):825-830.
- [11] SOHNA J E S, COOPER M. Does the sauerbrey equation hold true for binding of peptides and globular proteins to a QCM?: A systematic study of mass dependence of peptide and protein binding with a piezoelectric sensor[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2016, 11(12):71-77.