

# Least Square Multiple Linear Regression and Mie Light Scattering of Portable Dust Particle Monitoring System

Peng Liu, Xunguang Ju\*, Jingzhou Han, Wei Dai

Information and Electrical Engineering College, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou Jiangsu  
Email: 1282547862@qq.com, \*375768447@qq.com

Received: Aug. 29<sup>th</sup>, 2018; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2018; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Based on the Least Square Multiple Linear Regression (LSMLR) and Mie light scattering, a portable dust particle online monitoring system was designed. LSMLR was used to linearly compensate the data accuracy deviation. This solved the problem of low sensitivity of PM 2.5/10 particle concentration monitoring and provided data evidence and decision-making advice for environmental supervision and evaluation.

## Keywords

Mie Light Scattering, Least Square Multiple Linear Regression, Dust Particle, Correct Deviation, Photoelectric Detection

---

# 最小二乘多元线性回归及Mie光散射便携式扬尘粒子监测系统

刘 鹏, 鞠训光\*, 韩惊洲, 戴 薇

徐州工程学院信电工程学院, 江苏 徐州  
Email: 1282547862@qq.com, \*375768447@qq.com

收稿日期: 2018年8月29日; 录用日期: 2018年9月12日; 发布日期: 2018年9月19日

---

## 摘 要

基于Mie光散射原理设计便携式的扬尘粒子在线监测系统, 结合最小二乘多元线性回归方法对数据精度

\*通讯作者。

偏差进行线性修正补偿, 解决了监测PM 2.5/10颗粒质量浓度灵敏度低的问题, 为环境监管执法、评价提供数据证据及决策建议。

## 关键词

Mie光散射, 最小二乘多元回归, 扬尘粒子, 偏差修正, 光电探测

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来 PM 2.5/10 带来的雾霾天气不断加重, 城市施工带来的扬尘是重要来源, 人类呼吸系统对粒径小于 2.5 微米的颗粒几乎没有阻挡效果, 此类微小颗粒进入人体会引起呼吸系统炎症, 如何对扬尘粒子进行监测和预警是一大难题。

现有的测量方法分为两类, 一类是测量单位体积内颗粒物的数量, 另一类是测量颗粒物质量大小。目前广泛采用的方法有: 滤膜称重法[1]、 $\beta$ 射线吸收法[2]、超声波法[3]、压电晶体振荡法和光散射法[4]。

美国 Sensor 公司采用压电振动法开发的 SEMTECH QCM 颗粒物质量检测仪器, 用于研究测试发动机中排放的颗粒物浓度; 荷兰 Detaki 公司用空气动力学原理开发 RIPI 质量浓度检测仪, 可用于测量颗粒物直径; 美国 TSI 公司研发粒径测量仪器、粒子颗粒浓度测量仪器、气溶胶发生器等一系列产品。

综上所述(指对前人研究进展情况综述后), 扬尘粒子颗粒监测技术及监测设计, 目前, 其低成本、精准监测研究仍处于起步阶段; 如化学方法等虽较准确, 但成本高、实时性差、监测实施极易受环境条件限制。

因此, 研究设计出高性价比、容操作实施的便携式扬尘颗粒监测仪器设备系统, 是目前监测执法及应用急需。本设计基于 Mie 光散射检测的扬尘粒子检测系统能够通过灵敏度较低的实验数据, 通过采用最小二乘等方法对数据进行修正, 使得 PM 2.5/10 扬尘粒子测量值更加准确, 为监测及评价提供更高的标准。

## 2. 设计方案

该项目设计出一种能够全方位, 全时段, 实时显示预警扬尘粒子浓度的便携式监测装置, 使得传感器采集的数据经过单片机处理数字化显示[5]。

该系统通过 PM 2.5/10 扬尘粒子传感器对环境污染颗粒进行监测, 通过 A/D 电路模块转换后输出数字信号, 采用串口通信实现传感器与单片机之间的数据传输, 融合湿度温度传感器, 对监测值进行湿温度补偿, 将监测数值实施显示在 LCD1602 液晶上, 通过按键切换显示湿温度值和 PM 2.5/10 粒子浓度值[6], 也可加入蜂鸣器使得系统监测数值超出设定上限, 环境污染大, 则蜂鸣器实现报警功能。

## 3. 工作原理

### 3.1. 基本原理简介

#### 3.1.1. SDS011 激光传感器原理

本系统主要由信号采集、信号处理、终端处理、数据显示四部分组成。其中 Mie 散射原理简介如下: 当  $N$  个颗粒物构成颗粒群通过光敏区时, 与红外发光二极管发出一定强度的光相遇后而发生光散射。

光电探测器通过光电转换方式，将收集光通量大小转换成电压大小。

光通量大小[7]为：

$$F = N \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \int_{D=\bar{w}}^{D=\bar{w}+\beta} \int_{\theta=\phi-\beta}^{\theta=\phi+\beta} [i_1(D, \theta, m) + i_2(D, \theta, m)] w(\theta, \phi) F_N(D) dD d\theta \quad (1)$$

式中： $i_1(D, \theta, m)$ 和 $i_2(D, \theta, m)$ 为通过 Mie 散射理论计算得出的强度函数式； $N$ 为颗粒物的数目； $F_N(D)$ 为颗粒物数目分布函数。 $w(\theta, \phi)$ 为光散射探测立体角。

通过分析现有的光散射传感器，针对扬尘粒子的具体特性，应用光学仿真软件研究得到的 Mie 散射参数，确定传感器采光立体角、采光中心角、颗粒折射率的最佳数值，并据此针对参数误差修正取样数据。

### 3.1.2. 采用最小二乘和多元回归分析[8]修正后的测量结果校准方程

#### 1) 相对湿度

DHT11 可以通过 DATA 数据总线直接输出数字量湿度值。该湿度值称为“相对湿度”，需要进行线性补偿和温度补偿后才能得到较为准确的湿度值，湿度的非线性补偿如图 1 所示。为获得较为准确的测量数值，可以采用式(2)进行信号转换。

$$RH_{linear} = C_1 + C_2 \cdot SO_{RH} + C_3 \cdot SO_{RH}^2 (\%RH) \quad (2)$$

式中， $RH_{linear}$ 为经过线性补偿后的湿度值； $SO_{RH}$ 为相对湿度测量值； $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为线性补偿系数，参数如表 1 所示。

#### 2) 温度

由能隙材料 PTAT (正比于绝对温度)研发的传感器具有极好的线性，可用式 2 将数字输出( $SO_T$ )转换为温度值，温度转换系数如表 2 所示。

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (3)$$

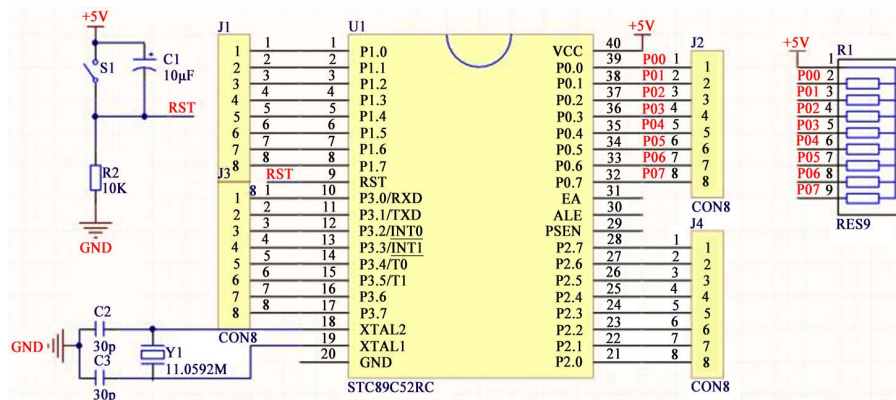


Figure 1. STC89C52 pin diagram

图 1. STC89C52 引脚图

Table 1. Humidity compensation coefficient of temperature signal

表 1. 温度信号的湿度补偿系数

$SO_{RH}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

### 3) 湿度信号的温度补偿

由于温度对湿度的影响十分明显，而实际温度和测试参考温度 250 °C 有所不同，所以对线性补偿后的湿度值进行温度补偿很有必要，补偿公式如式(4)所示。

$$RH_{ture} = (T - 25)(t_1 + t_2 SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (4)$$

式中， $RH_{ture}$  为经过线性补偿后的湿度值， $T$  为测试湿度值时的温度(0 °C)； $t_1$  和  $t_2$  为温度补偿系数，湿度信号的温度补偿系数如表 3 所示。

### 4) 湿温度信号对 PM 2.5 浓度补偿

由于温度、湿度对 PM 2.5 浓度影响较大，所以对线性补偿后的浓度值进行温度补偿很有必要，补偿公式如式(5)所示，该公式在控制光照以及高度一定条件下测得：

$$C_{PM\ 2.5\ ture} = C_{PM\ 2.5} - 1.662T + 2.431RH_{linear} + 89.49 \quad (5)$$

## 3.2. 电路原理图

### 3.2.1. 扬尘粒子信号采集装置

本系统采用的信号采集为 PM 2.5/10 传感器[9]，该模块采用基于红外光线散射吸收的处理模式，接受模块根据光信号强弱；能够输出数字信号(高低电平)，数字输出高低范围可调；也能够输出模拟信号(电压信号)；采用电脑插口 USB 供电，可以兼容大部分的单片机系统。

5001-S03D 是一款激光数字式粒子传感器，其采用光散射原理，激光在颗粒物上产生散射光，由光电接收器件转变为电信号，再通过特定算法计算得出 PM 2.5 和 PM 10 质量浓度、PM 0.3~PM 2.5 粒子个数、PM 2.5~PM 10 粒子个数。

### 3.2.2. 温度湿度信号采集装置

DHT11 数字温湿度传感器是一款含有已校准数字信号输出的温湿度复合传感器。它应用专用的数字模块采集技术和温湿度传感技术，确保产品具有极高的可靠性与卓越的长期稳定性。传感器包括一个电阻式感湿元件和一个 NTC 测温元件，并与一个高性能 8 位单片机相连接。因此该产品具有品质卓越、超快响应、抗干扰能力强、性价比极高等优点。每个 DHT11 传感器都在极为精确的湿度校验室中进行校准。

### 3.2.3. 控制终端电路

本系统采用 8 位的 STC89C52 单片机作为控制终端，此类芯片 40 引脚及对应编号图 1。

### 3.2.4. 功能实现原理

本系统采用的 PM 2.5/10 数值采集装置通过红外光线的散射来实现。平行单色光入射到被测颗粒场时，受周围颗粒散射及吸收影响，光线衰减率可求[10]，并可近线性反映颗粒浓度，电信号可以反映衰减率。A/D 转换模块将信号输入单片机，液晶显示模块显示当前实时 PM 2.5/10 浓度，结合湿度温度数据对 PM 值进行湿温度补偿(图 2)。

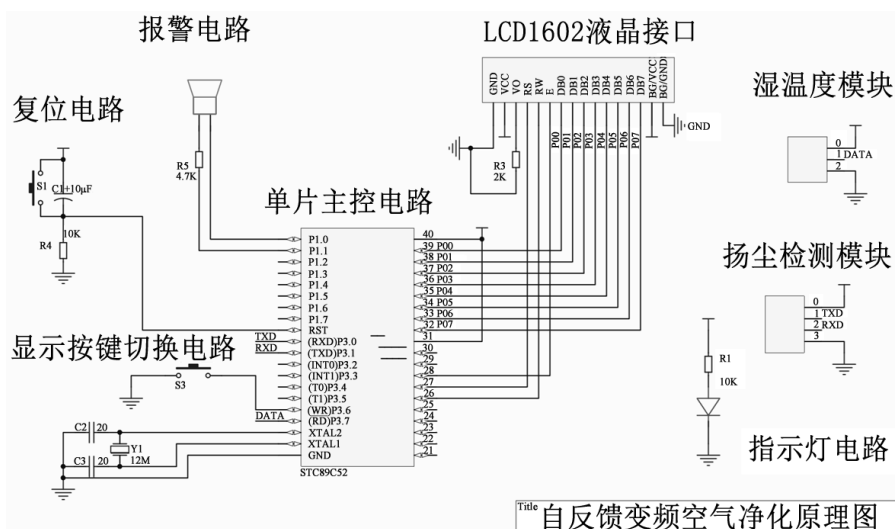
Table 2. Temperature conversion coefficient table

表 2. 温度转换系数表

VDD	$d_1/^\circ\text{C}$	$d_1/^\circ\text{F}$	$SO_T$	$d_2/^\circ\text{C}$	$D_2/^\circ\text{F}$
5 V	-40.1	-40.2	14 bit	0.01	0.018
4 V	-39.8	-39.6	12 bit	0.04	0.072
3 V	-39.7	-39.5	-	-	-
2 V	-39.6	-39.3	-	-	-
1 V	-39.4	-38.9	-	-	-

**Table 3.** Temperature compensation coefficient table of humidity signal  
**表 3.** 湿度信号的温度补偿系数表

$SO_{RH}$	$t_1$	$t_2$
12 bit	0.01	0.00008
8 bit	0.01	0.00128



**Figure 2.** Detection display schematic  
**图 2.** 检测显示原理图

### 3.2.5. 系统误差分析

对影响结果比较大的几个量进行灵敏性分析，考虑 PM 2.5/10 湿度参数作为灵敏性分析。原因空气湿度的大小会影响光电传感器信号接收效果，因此分析湿度变化 PM 2.5 值的变化是具有实际意义的。

对周围环境加湿，取不同的湿度，进行 PM 2.5/10 浓度值的测量，得到如表 4 所示。

取不同的湿度进行灵敏度分析，将灵敏度数据表示成相对改变量或百分比改变的形式，计算结果表明相对湿度对粒子浓度的影响较小，说明该系统对浓度的测量结果对外界的灵敏度较好。

控制湿度温度不变，研究系统在同一时间段内所测不同地点 PM 2.5 在平均值范围内波动情况及误差范围，如图 3 所示。

可见系统误差在 15% 以内，该系统具有良好的灵敏性，可应用于环境监测中。

## 4. 技术关键

本设计融合物理上的光散射技术[1]、多传感器检测[2]、数据处理分析以及光电检测等技术，研发可便携式携带的环境扬尘粒子自动监测系统，结合湿温度数据，建立最小二乘模型对 PM 2.5 和 PM 10 粒子进行数据补偿修正，以实现精确测量环境目的。

光散射法测量颗粒质量浓度是一种非接触式颗粒物质量浓度检测方法。该设计研究内容包括光散射法的理论研究和光学数值仿真研究，传感器的光学结构研究设计，微弱信号放大电路设计以及传感器实验结果数据研究和分析等。

## 5. 产品参数结果

如表 5。

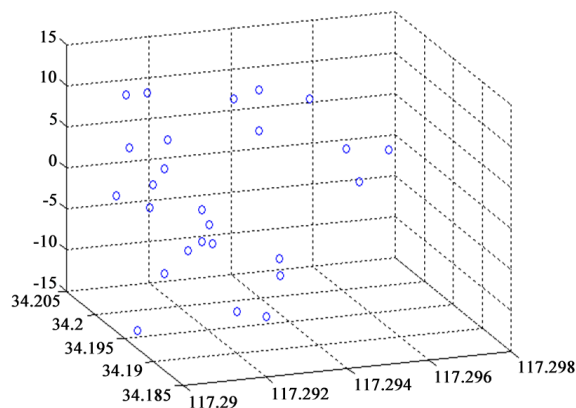


Figure 3. PM 2.5 concentration error

图 3. PM 2.5 浓度误差图

Table 4. Sensitivity test

表 4. 灵敏度检验表

相对湿度	0.4 (减少 20%)	0.6	0.8 (增加 20%)
PM 2.5	67.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	69.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	69.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM 10	172.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	173.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	172.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Table 5. Product parameter result test table

表 5. 产品参数结果测试表

序号	项目	参数
1	测量输出	PM 2.5/PM 10
2	量程	0.0~999.9 $\text{mg}/\text{m}^3$
3	供电电压	5 V
4	最大工作电流	100 mA
5	休眠电流	2 mA
6	工作温度范围	-20 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$
7	响应时间	1 s
8	颗粒物直径分辨率	0.3 $\mu\text{m}$
9	相对误差	15%
10	产品尺寸	160 * 130 * 100 mm

## 6. 创新点及应用

### 6.1. 创新点

- 1) 监测装置较小便于携带，可用来监测不同高度不同条件下的扬尘粒子，提高数据采集可靠性和系统的可扩展性
- 2) 基于物理上的 Mie 散射理论，实现不同条件下粒子含量测量，探析扬尘粒子的分布规律。
- 3) 应用最小二乘算法和多元线性回归，结合温湿度数据，对监测结果进行线性补偿，提高监测结果的准确性，使得低成本的监测技术更加准确。

### 6.2. 应用

该项目设计出一种能够全方位，全时段，实时显示预警扬尘粒子浓度的便携式监测装置，使得传感

器采集的数据经过单片机处理数字化显示。能够用作户外环境监测以及工地扬尘监测。

## 基金项目

江苏省科学技术厅计划项目“城市施工环境扬尘污染监测与预警系统研发”BY2015024-03), 徐州市科技计划项目“城市施工环境扬尘污染监测与预警系统研发”(KC16SQ185)。

## 参考文献

- [1] 冯建儿, 韩鹏. 基于滤膜称重法的大气颗粒物自动检测仪[J]. 计算机与现代化, 2013(7): 95-98.
- [2] 秦臻. 一种  $20\text{mg}/\text{m}^3$  光散射法粉尘仪样机的研制[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [3] John Wiley & Sons (2011) Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. *Aerosol Science & Technology*, 7, 682-683.
- [4] 张棚. 基于 Mie 散射的可吸入颗粒物浓度检测系统中的关键技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [5] 何强, 文卉. 基于单片机和 DSM501 测量 PM2.5 [J]. 电子技术, 2014(4): 27-28.
- [6] 张桂军, 石劭毅. PM2.5 颗粒物在线监测仪的测量原理及故障处理[J]. 广东科技, 2013, 22(12): 255.
- [7] 翟龙涛, 李庆才, 高勇善. 基于单片机控制的 PM2.5 空气净化器的设计与研究[J]. 电子世界, 2016(22): 55-57.
- [8] 王惠文, 叶明, Saporta, G. 多元线性回归模型的聚类分析方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7048-7050, 7056.
- [9] 周向阳, 张雅琴, 刘丽. 利用光散射法对细粒子(PM2.5)单片机主控检测仪的研制[J]. 数字技术与应用, 2015, 30(4): 55-57.
- [10] 兰冰芯, 湛海云, 陈东, 吉宁. 基于单片机的 PM2.5 测试仪的设计与实现[J]. 物联网技术, 2014, 4(11): 32-34, 38.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8801, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [csa@hanspub.org](mailto:csa@hanspub.org)