

一种考虑湿度修正的雾霾检测系统

何佳晶 周 晖 刘婷婷 赵静怡 徐智勇 黄启俊

(武汉大学 物理科学与技术学院 武汉 430072)

摘要:传统雾霾检测仪在计算雾霾浓度时,只考虑空气中固体悬浮物对光的散射,而没有考虑湿度对雾霾浓度的影响。针对传统雾霾检测仪的不足提出了一种包含湿度参数修正的雾霾浓度算法,设计完成了雾霾检测系统。为减少环境因素的影响,雾霾检测系统采用了封闭式的光学系统及恒定的光功率控制,设计了光发射模块、光接收模块、温湿度监控模块、控制模块、大气采样及光学模块和显示器。通过气溶胶发生器进行模拟实验测得雾霾浓度与散射光强度呈线性关系,线性相关系数为 0.976 5,通过最后对大气中 PM2.5 的检测证明该雾霾检测系统能够较好地实现测量。

关键词:雾霾;散射;msp430;湿度

中图分类号: TP211 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Mist haze detection system considering humidity correction

He Jiajing Zhou Hui Liu Tingting Zhao Jingyi Xu Zhiyong Huang Qijun

(School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Traditional haze detector haze when calculating the concentration in the air only consider the scattering of light suspended solids, without considering the effects of humidity on haze concentration. Aiming at the shortcomings of traditional haze detector, this paper presents an algorithm that contains concentrations of haze and humidity parameters amendment, designed to complete the haze detection system. To reduce the impact of environmental factors, haze detection system uses a closed optical system and a constant optical power control and designs the optical transmitter module, optical receiver module, temperature and humidity control module, control module, air sampling and optical module, monitors components. By experimentally measured concentrations and haze linear relationship between the intensity of the scattered light using aerosol generator, the linear correlation coefficient is 0.976 5. By detecting the concentration of PM2.5 in the atmosphere, finally proves that the haze detector can work effectively.

Keywords: haze; scatter; msp430; humidity

1 引言

近年来,伴随着我国工业化的快速发展,大气污染的问题越来越严重,作为表征近地大气污染程度的一个重要物理量,雾霾浓度日益被人们所关注。

雾霾浓度测量方法主要有光散射法^[1]、滤膜称重法^[2]、 β 射线法^[3]和振荡天平法^[4]等。传统的光散射法通过雾霾检测仪发射一束光,测量散射光强与发射光强之比计算雾霾浓度,环境温度、电源电压的变化会使检测仪发射光强发生变化,从而引起测量结果的误差,此外也没有考虑湿度对雾霾浓度的影响。因此,研究一种发射光强恒定,具备湿度修正的雾霾检测仪就具有重要的应用价值。

系统针对传统雾霾检测仪开放式光学模块对准困难、易受背景光影响的不足,改进采用了封闭式的光学系统。

此外,针对湿度因数对光散射法测量雾霾浓度进行了修正。系统通过 PWM 波调制的方式控制发射光强恒定,雾霾浓度仅与散射光强相关,克服了环境因素的影响。由于红外光穿透性较强,光发射模块采用 940 nm 红外 LED。通过实验模拟,建立雾霾浓度和散射光强的关系。

2 设计原理

光辐射在大气中被散射的程度可用线性散射系数描述,其中包括瑞利散射(分子线性散射)系数和米散射(气溶胶线性散射)系数。在具有实际意义的 100 km 水平能见度范围内,可认为: $\mu=\sigma$,亦即大气衰减系数与大气散射系数近似相等^[5]。

采用恒定的速率的抽气泵对大气样本进行采样,通过动力学原理分离出 PM2.5 颗粒进入采样空间,将发射模块

的红外光射入采样空间,空间中的气体样本对红外光产生散射,接收模块探测某一方向的散射信号。由 Mie 散射原理可知,气溶胶线性散射系数 σ_λ 为:

$$\sigma_\lambda = 2\pi N r^2 K(2\pi r/\lambda) \quad (1)$$

式中: N 为单位体积中的微粒数(m^{-3}), r 为散射微粒半径,与湿度有关, λ 为光辐射波长, $K(2\pi r/\lambda)$ 为散射面积比。

根据 Mie 散射理论,大气散射光强与散射系数 σ_λ 的比值近似为常数。测得的电压信号 S 和散射光强 I_s 成正比关系:

$$S = A\sigma_\lambda \quad (2)$$

由式(1)和(2)可以推导得到:

$$N = S/(2\pi A r^2 K(2\pi r/\lambda)) \quad (3)$$

在湿度一定的情况下, r 近似为常数,并且 K 与 $2\pi r/\lambda$ 线性相关,因此近似将式(3)写成:

$$N = S/(2\pi A r^3) \quad (4)$$

即 N 与 S 成一次线性关系。

当相对湿度为 f 时,湿气溶胶粒子半径 $r(f)$ 与干气溶胶粒子半径 r 之比可用经验公式表示^[6]:

$$r(f)/r = (1-f)^{-1/\mu} \quad (5)$$

式中: μ 为常数。对于海洋大气 $\mu = 3.9$,对于污染大气 $\mu = 4.4$ 。

考虑到湿度的影响,此时式(4)应修正为:

$$N = S/(2\pi A r^3 (1-f)^{-3/\mu}) \quad (6)$$

3 硬件系统设计

系统主要分为光发射模块、光接收模块、大气采样及光学模块、电压信号处理单元2、A/D转换、MSP430模块、电压信号处理单元1、光源控制单元、产生PWM波、定时器、算法实现、温湿度监控、显示终端。系统模块功能,如图1所示。

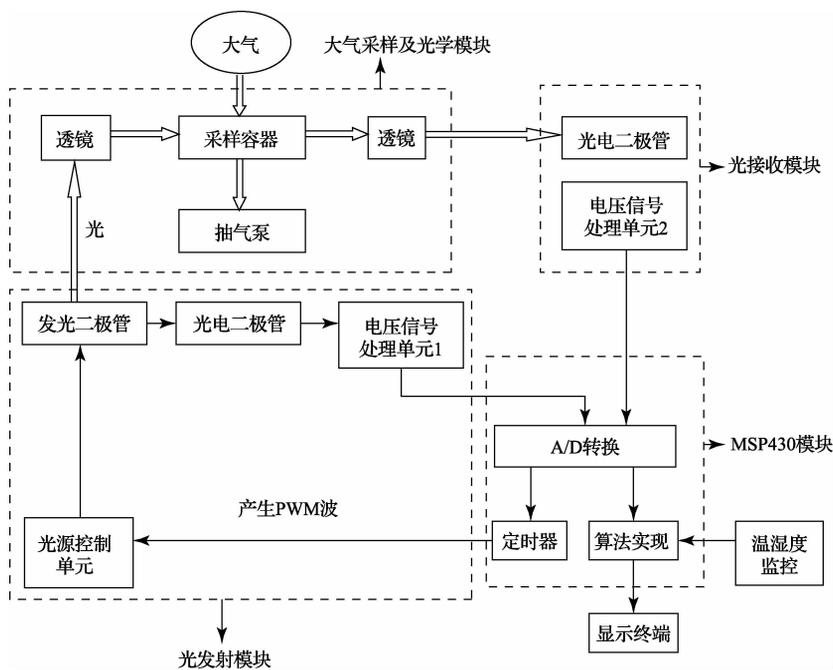


图1 系统模块功能

3.1 光发射模块的设计

光发射模块主要实现红外 LED 驱动,并维持恒定的发光强度。由采样容器、抽气泵和透镜组成。采用 max1916 恒流源作为驱动芯片,单片机产生的 PWM 信号,经与门调制后,输入 max1916en 端,从而驱动 IR333C 红外 LED。

3.2 光接收模块的设计

主要功能为光电转换、放大滤波、检波等。由光电二极管和电压信号处理单元组成。由于散射光强比较微弱,因此要求接收元件具有很高的灵敏性以及较高的放大倍数。

3.2.1 光电转换电路

光电转换电路将光信号转化为电信号,采用美国 B-B 公司研制的集光敏器件(光敏二极管)与信号放大的 OPT101。该元件输出为电压信号,输出电压随散射到光敏器件上的光强度成线性变化^[7]。

3.2.2 带通滤波电路

光电转换后的电信号,不但含有前向散射光的信号,还含有自然光的转化信号和白噪声、工频、器件本身的噪声干扰,其中以工频干扰为主。先让光电信号通过一个带通滤波电路。选用 TI 公司的 UAF42 芯片,设计的电路具有中心频率 2.3 kHz,带宽 230 Hz 的带通滤波器。带通滤

波电路如图 2 所示。

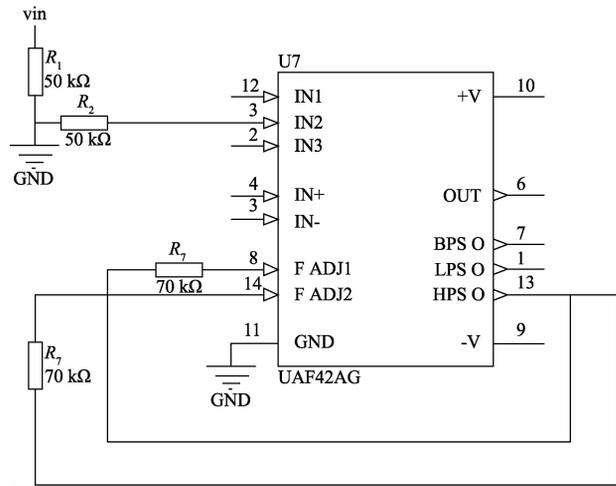


图 2 带通滤波电路

3.2.3 检波电路

信号经过带通滤波器后,输出 2.3 kHz 左右的正弦波信号,其真有效值即为对应的检测光信号的强度。为了便于单片机进行 A/D 转换,将此正弦波信号作真值转换。实验采用 AD637 作为检波芯片,进行真有效值转化。

3.3 大气采样及光学模块的设计

3.3.1 大气采样

采样模块如图 3 所示。



图 3 采样模块

过滤装置:采用直径 25 mm,孔径 3 μm 的滤膜将直径大于 3 μm 的微粒隔离在滤膜外,保证采样容器内都是直径在 2.5 μm 及其以下的微粒。

采样容器:采用透光性比较好的石英玻璃管作采样容器,内径 60 mm,长度 150 mm,在两个底面留了两个直径 30 mm 的孔,作为气体进入和与外界保持动态平衡的通道。

3.3.2 光学模块

传统的结构发射端与接受端分别为独立模块,所以在安装的时候需要对其进行空间对准,即发射光源与散射点所组成的空间和接受端与散射点所组成的空间相交,空间对准操作起来相对来说比较复杂^[8]。此外接受端与发射端均暴露在露天之下,虽然在两端口前加上了防护长管,但是由于背景光相对于散射光非常强,还是会存在非常大的干扰光。对于小信号提取装置来说,背景光的干扰会大大增

加后期提取信号的复杂度,也会给电路设计产生不便^[9]。

针对开放式光学模块的不足,将发射端与接收端以及全部的光学元件及部分电学元件封装在一个固定装置内,将外面涂层涂为白色,以防止长期暴露在阳光中过热,同时也避免背景光的干扰,使得内部的系统工作不稳定。光学模块设计图如图 4 所示。

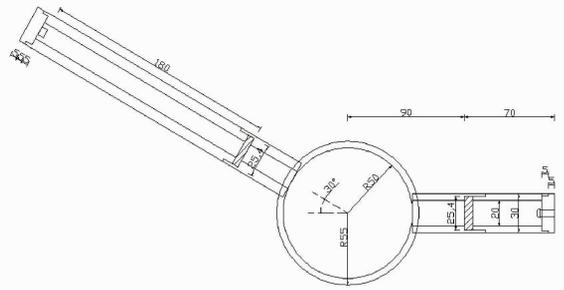


图 4 光学模块设计

1) 发射光路系统

相对孔径 D/f 越大对光的传递效果越佳^[10],但随着 D/f 的增加,制作工艺与成本也大幅度增加。考虑到测量仪的发射与接收端均封装在固定装置中,以及 LED 的尺寸、探测距离等因数,确定透镜的参数如下:孔径 D 取值为 34 mm,焦距 f 为 60 mm。

2) 接收光路系统

将发光二极管放置在透镜的焦平面上,达到对光束准直。因为发射端光轴与接收端光轴的共面性误差会引起光束的错位,散射光就会偏离接收光轴,从而导致样本的像偏离接收芯片的中心位置,接受的能量降低,使得实际的大气采样样本的体积减小。所以光束的发散角应当大些,使得采样的尺度宽松一些。将发射镜头放置在焦平面上是最合适的。

对于接收端的放置,通过成像定理对其位置进行确定:

$$1/l' - 1/l = 1/f \quad (7)$$

式中: l' 、 l 、 f 分别是像距、物距及透镜的焦距,将这些已知数据代入,可以得到像距为 180 mm。即接收端安装在镜头后方 180 mm 处。

3.4 温湿度模块的设计

采用 DHT11 温湿度模块,DHT11 模块在本系统中由控制模块 msp430 单片机编程控制,msp430 发送一次开始信号后,DHT11 从低功耗模式转换到高速模式,等待主机开始信号结束后,DHT11 发送响应信号,送出 40 bit 的数据,并触发一次信号采集,再由 msp430 读取部分数据通过显示器显示。

3.5 msp430 硬件模块的设计

msp430 模块由 A/D 转换、定时器组成。电压信

号处理单元1的信号经单片机处理后用于控制光功率恒定,电压信号处理单元2的信号用于之后的算法实现。

4 系统的软件设计

主要包括PWM光功率自动调节模块,模数转换模块,

温湿度测量模块,算法实现模块和显示模块。系统采用msp430F169作为核心控制单元,系统首先要进行初始化,端口设置,时钟设置,A/D转换的初始化,LCD的初始化等。

4.1 控制流程

msp430单片控制流程如图5所示。

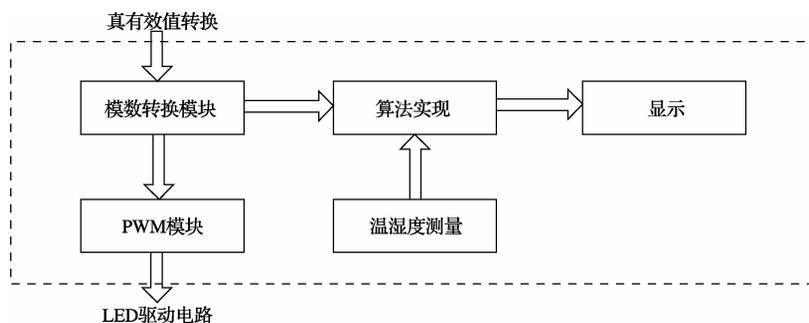


图5 msp430单片机控制流程

软件部分主要包括了PWM的产生、发射光强恒定的调控、温湿度的测量、接收光强的测量。单片机程序流程如图6所示。

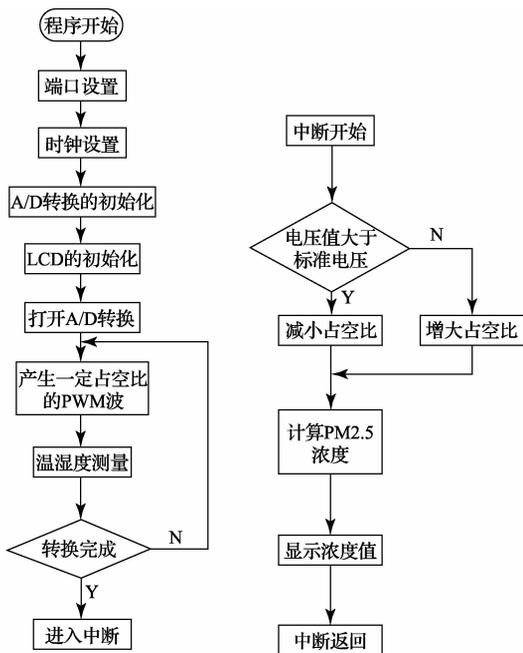


图6 单片机程序流程

4.2 PWM模块

本程序中PWM模块产生2.3 kHz和38 kHz的PWM波用以驱动红外LED发光,其中38 kHz为载波,将在后续程序中对该路PWM的占空比进行自动调节以实现发射光功率的恒定。

4.3 控制光功率恒定程序设计

光功率恒定是本系统的一个创新点。在现今已有的

关于雾霾的研究中,很少有对于控制光功率恒定的讨论,在本系统中加入这一功能以达到使测量结果更加精确的目的。A/D转换的输入通道口输入两路模拟信号,一路是检测红外LED发光光强的OPT101的电压信号;另一路是接收散射光信号的OPT101经过滤波,真有效值转换之后的电压信号。

当单片机开始工作以后,首先对两路电压信号作模数转换;第一路信号经过模数转换以后用来调制PWM的占空比,从而实现LED的恒定功率发光。

4.4 A/D转换模块

经过真有效值转换以后的信号仍是模拟信号,而微处理器只能处理数字信号,所以需要将模拟信号转换为数字信号。msp430单片机内部集成了12位A/D转换模块,分辨率达到0.0008 V,在序列通道多次转换模式下,msp430每进行完一次序列通道的转换就会自动进入中断进行数据处理,当转换寄存器中的转换值被取出之后自动进行下一次通道转换。

5 测量与分析

各模块电路测试完成之后,通过实验测量采样气体浓度与散射光强度之间的线性关系来反映系统构建的正确性。

采用简易的气溶胶发生器制作气溶胶样品,气溶胶发生器每单位时间产生的颗粒物浓度相等,分别工作1~7个单位时间,将制得的样品备用。对每组数据进行10次以上的测量,当气溶胶气体浓度成倍数上升时,运用msp430F169处理芯片,通过周期性测量散射光,可得图7所示曲线,该曲线线性相关,当实验装置发出的气溶胶气体浓度由1倍慢慢向7倍上升时,相应的散射光强度也呈

等比例上升。通过线性拟合,得到 $Y=0.0177X+0.0375$ (其中, X 表示雾霾相对浓度, Y 表示测得电压相对值), 其相关系数为 0.9765。

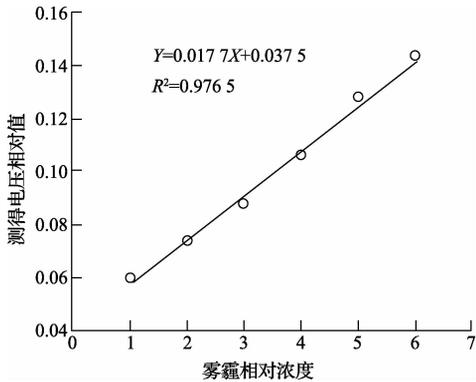


图7 系统响应

对比了武汉市气象局发布的 PM2.5 实测值与本系统的测量值(用电压大小表示), 从对应折线图图 8 可以看出, 武汉市武昌紫阳 2014 年 2 月 25 日一天内对应 PM2.5 的实测值与用本系统所测得的电压值呈现一致的趋势。

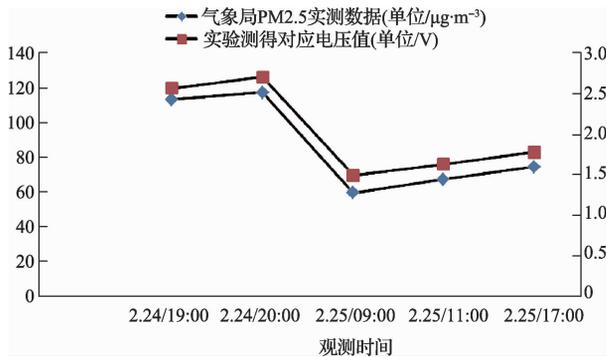


图8 PM2.5 浓度与实验电压值的关系

考虑到光散射法测量会受到湿度的影响, 又对相同浓度下, 电压随湿度的变化关系进行了测量。结果显示当相对湿度 $< 50\%$ 时, 湿度对光散射法测得的电压无统计学相关; 当相对湿度 $> 50\%$ 时, 两种方法的测定结果比值与相对湿度之间存在统计学正相关, 测得的电压值随湿度的增加线性增加。国外有研究指出颗粒物在不同相对湿度环境下吸收水分的量会因其组成成分的不同发生一定程度的变化^[11], 因此相对湿度对光散射法测定 PM2.5 浓度的影响可能因为 PM2.5 组成成分的不同发生变化。

6 结 论

设计实现了一个雾霾检测系统, 通过发射模块、接收模块、温湿度探测模块、控制模块的工作, 得出散射光的电

压值与雾霾浓度之间的对应关系, 由最后测试所得到的数据结果来看, 可以实现雾霾浓度的检测。同时还对湿度对光散射法的测量进行了探究, 得到了定性关系。但是并未对大气 PM2.5 成分进行测定, 因此无法定量分析相对湿度对光散射法测定结果的影响与大气 PM2.5 成分之间的关系。在今后的工作中, 应进一步开展相对湿度对光散射法测定不同组成成分 PM2.5 的影响研究, 以定量分析相对湿度对光散射法测定不同组成成分的 PM2.5 的影响情况, 为光散射法测定准确性的改善提供科学依据。

参考文献

- [1] 陈庭将. 光散射法在颗粒测量技术中的应用[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [2] 朱一川, 张晶, 毕昕, 等. 具有修正湿度对颗粒物测量干扰功能的在线式精准型激光粉尘仪及其与称重法对比实验结果[J]. 中国硅酸盐学会环保学术年会论文集, 2012.
- [3] 梁艳, 张增福, 陈文亮, 等. 基于 β 射线法的新型 PM2.5 自动监测系统研究[J]. 传感技术学报, 2014, 10:1418-1422.
- [4] 詹锴, 刘建国, 陆钊, 等. 霍尔元件在微量振荡天平监测仪中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 99-102.
- [5] 邹瑞杰, 陈玉榜, 房彦军, 等. 基于 Mie 散射的水中油污在线检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3):655-660.
- [6] KASTEN F. Visibility forecast in the phase of pre-condensation[J]. Tellus, 1969, 21(5): 631-635.
- [7] 王廷林, 陈炜钢. OPT101 型光电传感器的技术性能与应用[J]. 传感器世界, 1999, 5(10): 31-32.
- [8] 邓可, 胡建平, 张平华. 基于红外散射原理的能见度仪设计[J]. 测控技术, 2004, 23(2):19-21.
- [9] 李建新. 激光准直扩束设计和仿真[J]. 装备制造技术, 2009(3): 28-31.
- [10] 刘钧, 高明. 光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [11] 黄婧, 邓芙蓉, 吴少伟, 等. 相对湿度对光散射法测定大气细颗粒物浓度的影响[J]. 中国预防医学杂志, 2012(5):321-326.

作者简介

何佳晶, 本科生。主要研究方向为微纳电子学和芯片设计。

E-mail: hjj0411@whu.edu.cn

黄启俊, 教授, 博士生导师。主要研究方向为微电子系统设计、探测系统(仪器)研发。

E-mail: huangqj@whu.edu.cn