

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108438

基于光学散射原理的气溶胶光度计开发*

张 白¹ 王 鹤¹ 高 正² 孔德超¹ 魏栋梁¹

(1.北方民族大学电气信息工程学院 银川 750000; 2.吴江市华宇净化设备有限公司 苏州 215000)

摘要:为应对高效准确的气溶胶质量浓度测量问题,本文使用光散射法测量气溶胶质量浓度原理开发了一套气溶胶光度计。设计了恒流量控制模块,利用待测气溶胶在激光照射下产生的前向散射光与质量浓度成正比原理,使用光电倍增管将光信号转换成电信号,根据相同测量条件下高精度对比仪器结果进行线性系数计算。经实验证明,本文开发气溶胶光度计系统示值误差在能在 $\pm 5\%$ 以内,重复性偏差在 3% 以内,符合气溶胶光度计校准规范的要求,实现了气溶胶质量浓度测量,具有较好的应用价值。

关键词:光散射;光电转换;质量浓度;流量控制;嵌入式数据库

中图分类号: TH744; TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Development of aerosol photometer based on optical scattering principle

Zhang Bai¹ Wang He¹ Gao Zheng² Kong Dechao¹ Wei Dongliang¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750000, China;

2. Wujiang Huayu Cleaning Equipment Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to solve the problem of efficient and accurate measurement of aerosol mass concentration, an aerosol photometer is developed based on the principle of measuring aerosol mass concentration by light scattering method. The constant flow control module is designed. Based on the principle that the forward scattered light of aerosol by laser irradiation is proportional to the mass concentration, the optical signal is converted to electrical signal by photomultiplier tube, and the linear coefficient is calculated according to the high-precision comparison instrument results under the same measurement conditions. The experimental results show that the indication error of the aerosol photometer system developed in this paper can be within $\pm 5\%$, and the repeatability deviation is within 3% , which meets the requirements of aerosol photometer calibration specification, realizes the measurement of aerosol mass concentration, and has good application value.

Keywords: light scattering; photoelectric conversion; mass concentration detection; flow control; embedded databases

0 引 言

随着人类社会工业化进程的推进,越来越严重的环境问题对人们的生产生活造成了明显影响,特别是人体健康与生态环境遭到严重挑战^[1]。随着煤电装机容量的不断扩大,燃油汽车的广泛应用,造成了大气颗粒物的浓度不断上升,PM2.5、PM10等大气质量指标已经被人们广泛关注。大气颗粒物浓度的上升首先是对人体健康方面造成了威胁,在长时间污染大气下生活,会造成各种呼吸道疾病以及其他并发症。随着越来越多科研人员的努力,目前人们已经掌握了很多气溶胶质量浓度测量的技术手段。目前,常用的气溶胶浓度测量方法主要有微量振荡天平法、压电晶体法、 β 射线吸收法、光散射法^[2]。其中,光散射法^[3]因其重

复性高、精度高、测量速度快、测量范围广等优点广泛应用于相关科学研究和仪器领域,也是目前气溶胶光度计重点研究方向。

利用光散射原理测量质量浓度的方法主要有两类:单粒子光散射法和颗粒群光散射法^[4]。单粒子法是通过假设对颗粒物的密度、折射率已知,对颗粒物等效成大小不一的圆球,使用等效直径的概念,由颗粒物的数目浓度来进行质量浓度的反演工作^[5]。根据其原理设计机型主要有德国 GRIMM 公司的 1100 系列颗粒物分析仪^[6]、英国 Casella CEL 公司 DUSTMATE 手持式环境粉尘监测仪等^[7]。颗粒群法也称光度计法,是通过对待测气溶胶产生的散射光强进行采样,通过采样电信号与测得质量浓度进行对比分

收稿日期:2021-11-24

* 基金项目:国家自然科学基金(52065002)项目资助

析^[8]。根据其原理设计生产的机型主要有美国 TSI 公司生产的 8587A/8177 两款气溶胶光度计⁹、美国 ATI 公司推出的 ATI-2h/ATI-2i 系列气溶胶光度计。光度计法相比于单粒子法其更适用于浓度较高的场合,测量范围大,因此 ATI-2h/ATI-2i 两款气溶胶光度计占据了大部分市场份额。国内外在气溶胶浓度测量理论方面未见新的突破,各研究机构与企业主要在光散射测量结构与光电器件方面进行改进,苏州苏净集团有限公司孙吉勇等^[10]提出激光暗场技术,中国计量科学研究院肖骥等^[11]在气溶胶光度计校准方面提出被动式混匀技术,上海市计量测试技术研究院张爱亮等^[12]提出了一种基于滤膜采样法的气溶胶光度计质量浓度校准方法。

气溶胶光度计又称高效过滤器检漏仪,是一种利用光散射法测量气溶胶质量浓度的仪器。此仪器常被用于检查高效送风口、洁净房、生物安全柜、手套箱等设备中的高效过滤器泄漏量检测,验证各种高效过滤器的过滤性能^[13]。当前高精度气溶胶光度计依赖国外进口,国内产品重复性与精度与进口产品存在一定距离,难以满足企业要求。对气溶胶光度计重复性高,测量速度快的工作需求,本文基于颗粒群前向散射原理设计气溶胶光度计,并通过实验获得线性系数,进而计算气溶胶质量浓度,最后,采用美国 ATI-2i 型气溶胶光度计进行比对实验,验证实验结果。本文预期实现高精度的气体流量控制,并在此基础上实现满足气溶胶光度计校准规范的原理样机。

1 气溶胶光度计工作原理

气溶胶光度计通过对高效过滤器上游与下游分别测量获得待测过滤器的过滤性能,基本结构如图 1 所示。测量时首先使用气溶胶发生器产生国标规定的特殊检测气体,即 PAO 油(Polymeric α -Olefin 聚 α 烯烃)雾化气溶胶,将其接入到待测过滤器的上游,通过真空泵分别吸入至待测过滤器的上游和下游,通过上下游气溶胶的质量浓度数据比对,来确认待测高效过滤器是否存在泄漏。设计阀门控制系统实现上下游气溶胶检测气路的切换,确保测量单元在任意时刻仅对一路气溶胶进行测量。设计恒流量控制系统实现气泵的控制,气体经过传感器后过滤排出。传感器利用光电检测系统把待测气溶胶的光散射值变成电信号,接收信号送入微处理器进行数据处理获取当前气溶胶质量浓度。

2 气溶胶光度计测量原理与传感器设计

Mie 散射理论是光散射法相关仪器开发的理论基础,颗粒物检测仪器基本都是基于 Mie 散射(Mie scattering)理论或者近似理论^[14]。本设计采用的传感器基于 Mie 散射的前向散射原理。

2.1 基于前向散射原理的颗粒群光散射法

颗粒群光散射法测量颗粒物质量浓度的基本原理如

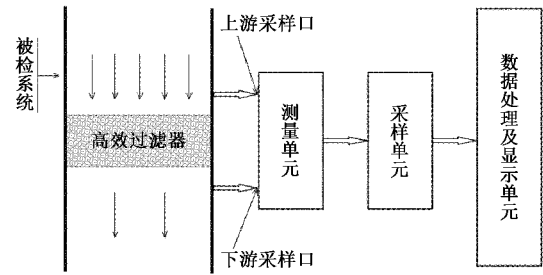


图 1 气溶胶光度计结构

下:在颗粒性质一定的条件下,颗粒物的散射光强度与其质量浓度成正比,测量散射暗室前向散射光强信号来反演颗粒物的质量浓度^[15]。在质量浓度值与光电传感器输出电压值的比例系数合理设定下,直接进行换算,不考虑粒径的大小、数量和检测时间^[16]。设散射截面为 σ_i 颗粒的散射系数为 K_i ,入射光光强为 I_0 ,则单个颗粒的散射光能为:

$$E_{si} = I_0 \times K_i \times \sigma_i \quad (1)$$

设颗粒物的某粒径直径为 D_i ,则该粒径分布为 $f(D)$,该通道总数为 N_i ,则整体个数为 N ,总散射光能 E_s 为:

$$E_s = N \times \int [(f(D) \times K_i) dD] \quad (2)$$

设待测颗粒物的密度为 ρ ,我们可以认为颗粒物的质量 W 为:

$$W = N \times \rho \times \frac{\int [(f(D) \times \pi \times 3D^3) dD]}{4} \quad (3)$$

将式(2)代入到式(3)可得:

$$W = \frac{E_s \times \rho \times \int [(f(D) \times \pi \times 3D^3) dD]}{\int [(f(D) \times K_i) dD] \times 4} \quad (4)$$

设测量体积为 V ,则待测气体的颗粒物质量浓度 C 为:

$$C = E_s \times \frac{\rho \times \int [(f(D) \times \pi \times 3D^3) dD]}{\int [(f(D) \times K_i) dD] \times 4 \times V} \quad (5)$$

由式(5)可知,颗粒物的质量浓度与散射光强度有关,其他参数在颗粒群法计算时受到仪器性能、待测粒子物理属性等影响,可统一简化为系数 K ,因此可得颗粒物的质量浓度与散射光值呈线性比例关系,如式(6)所示。

$$C = E_s \times K \quad (6)$$

2.2 气溶胶光度计传感器结构和原理

基于前向散射法的气溶胶光度计质量浓度传感器结构如图 2 所示,当颗粒物经过激光区时,由于待测物质的气溶胶特性,透射过去的光称为散射光,不透过为反射光^[17]。散射光输出方向与输入光线夹角小于 90° 的称之为前向散射,大于 90° 为后向散射^[18]。当颗粒物的体积与入射波长相比较小时,前向散射光强与后向散射光强相当,当输入浓度增大时,前向散射光强将大于后散射光^[19]。前向散射光的信号较强,受气溶胶粒子材料性质影响比较小,因此在气

溶胶光度计的相关标准中,通常要求采用前向散射光作为检测信号。

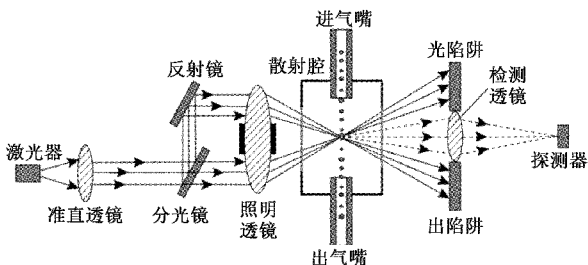


图 2 气溶胶光度计质量浓度传感器内部结构

该传感器结构分为 3 个部分:激光发射及整形腔体、颗粒物采样腔体、散射光采样腔体,整体封装在暗室腔体内。测量过程中,使用特定波长的激光器发射激光,经过准直透镜将输出平行激光束。激光进入第 1 部分腔体后,其中一部分光透过分光镜直射在照明透镜上,另一部分通过分光镜片照射到反射镜上,再经过反射镜片照射到照明透镜上。此时激光器发射的光束出现在照明透镜的边缘部分,其中心部分使用遮光片盖住,防止有小部分偏离光线穿过照明透镜直接射入后续光路。

照明透镜右侧为颗粒物采样腔体。使用真空泵吸气,待测气溶胶从进气嘴进入,出气嘴排出。平行光束经过照明透镜边缘部分再次聚焦在散射腔体正中心位置。聚焦后的光线沿着原方向射入到光散射腔体,如图 2 实线所示。

散射光采样腔设计光陷阱,使其在无散射状态时,进入腔体光束正好被完全吸收,且检测透镜正好无光束经过,光电探测器无信号输出。当有待测气流被吸入采样腔体后,颗粒物经过焦点处,待测气溶胶发生光散射现象。其中一部分光束射到散射光采样腔的检测透镜上,如图 2 虚线所示。检测透镜再次将散射光焦点置于光电探测器上,产生光电信号。当待测颗粒物浓度越大,产生前向散射的效果越强,光电探测器接受的光强越大,输出信号越强^[20]。

3 系统设计

本文采用 STM32F407ZGT6 作为仪器主控芯片,搭配各模块完成气溶胶质量浓度的采集、反演、标定等工作。

3.1 光电检测系统设计

1) 光电传感器选型

在颗粒物探测领域,其散射光的光强变化通常非常微弱。由于光电倍增管的放大增益高,微弱光信号测量常常采用光电倍增管作为光电转换器件^[21]。本文选用滨松光子 1P21 型光电倍增管,具体参数如表 1 所示。

2) 跨阻放大器设计

由于光电倍增管输出电流信号十分微弱,普通运算放大器的输入偏置电流过大,不适用于微弱电流信号放大。因此本文选择超低输入偏置电流的运算放大器 LMP7721^[22]作为信号的转换芯片,电路原理如图 3 所示。

表 1 1P21 型光电倍增管参数

参数	数据
光谱响应/nm	300~650
最大响应波长/nm	400
最大电源电压/V	1 250
平均阳极电流/mA	0.1
环境温度/°C	-80~+50

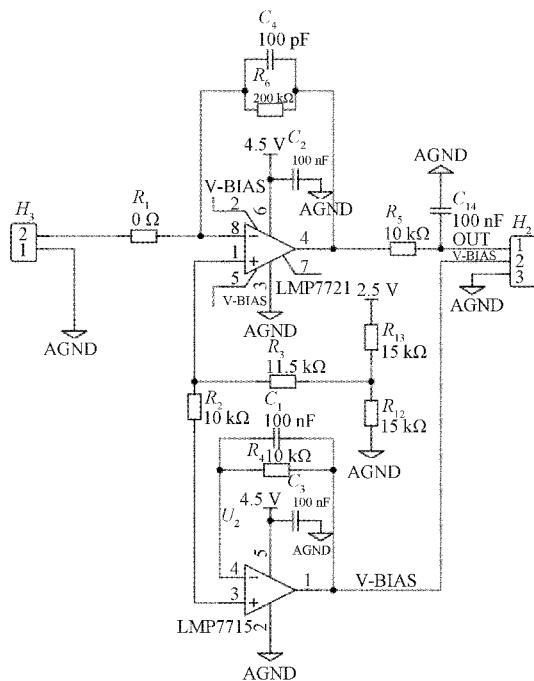


图 3 跨阻放大器设计原理

光电倍增管阳极接地,其输出为负电流信号,因此电流输入端接运算放大器的负极输入。此时放大电路的输出电压公式为:

$$U_o = -R \times I \quad (7)$$

R_6 为放大电阻,阻值为 200 kΩ,因此放大电路的输出与输入关系为:

$$U_o = -200\,000 \times I \quad (8)$$

电压在输出后经过由 R_3 、 C_4 组成的一阶低通滤波器输出。

为了抑制漏电流对输入微弱信号的影响,在本设计中增加了针对漏电流影响的输入保护环设计。在图 3 中, LMP7715 组成了低阻抗源驱动器,并将输出端接至保护环上,保护环将输入信号包围,保护微弱信号不被干扰。输入端接跨阻放大器的正向输入端,即基准电压输入端。低阻抗源驱动器同时还是电压跟随器, LMP7715 对 LMP7721 基准电压进行跟随,使保护环电位和跨阻放大器的基准电位相同。在静态时,保护环和内部电压的压差基本相同,都为 V_{ref} ,极大减小了漏电流的产生。当干扰信号从保护环外部对电路进行干扰时,保护环的低阻特性能让干扰信号

被有效吸收,达到了保护的目的。

3) AD 转换设计

本文采用 AD7789 作为传感器输出信号采集芯片。此款芯片为 24 位分辨率、单通道、超低功耗 $\Sigma-\Delta$ 型 ADC,能够对 50 和 60 Hz 干扰信号进行抑制^[23]。AD7789 采用差分输入方式,将跨阻放大器的输出端接至 AD7789 的正向输入端,将信号保护环接入到 AD7789 的负输入端,可消除电源纹波以及外部噪声产生的信号叠加干扰。

光电倍增管输出电流信号如图 4 所示。当被测气溶胶质量浓度较小时,其输出电流呈现微弱脉冲信号,如图 4(c)所示;当质量浓度增加时,光电倍增管输出电流信号变为有一定直流偏移的大量脉冲信号,如图 4(b)所示;随着被测气溶胶质量浓度继续增大,其输出信号表现为直流信号叠加高频脉冲信号,如图 4(a)所示。基于前向散射的颗粒群法对气溶胶气体进行质量浓度测量时,不考虑其待测气体的粒径大小和单个颗粒物产生的脉冲高度,只考虑颗粒群在采集腔体产生的整体前向散射光强度。

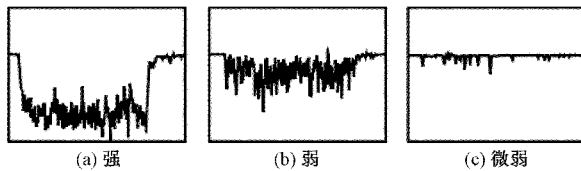


图 4 光电倍增管输出信号

因此,采集信号在经过放大、滤波后还需要进行软件滤波处理。本文使用限幅+滑动平均滤波算法^[24]对采集的电压值进行滤波计算。先对输入原始信号进行限幅,当某个数据与前一个数据做差的结果超过设定阈值时,将此数据设置为前一值相等。然后设定 N 个元素的一维数组 Value[N],把连续采集的 $N-1$ 个电压值依次从 Value[0] 存放至 Value[$N-2$],将各电压值计算的平均值作为第 1 个值进行质量浓度计算。当有下个数据来时,将其存放在 Value[$N-1$],存放完将数组元素整体前移一个位置,Value[0]被 Value[1]覆盖,Value[$N-1$]再次空出,然后计算数组前 $N-1$ 个元素的电压平均值作为第 2 个值进行质量浓度计算。空出的 Value[$N-1$]等待下一个测量数据。

图 5 为 MATLAB 软件仿真效果图,图中细线表示脉冲杂波较多的模拟待处理的波形,表现为在低频信号上叠加高频交流信号。该波形经过限幅设置,剔除尖峰脉冲后使用滑动平均滤波。图中粗线表示为滤波后的曲线,最终呈现为较为平滑稳定的结果,其高频信号被有效滤除。

3.2 环境参数采集

环境参数的采集主要包括采集大气压、温度的相关数据。温度采集使用 SDN1608 型 NTC 热敏电阻进行采集,其温度与阻值变换关系如式(9)所示。

$$R_T = R_0 \times e^{\left(\frac{B}{T-1} \times \frac{1}{T_0}\right)} \quad (9)$$

其中, R_T 为在温度为 $T(K)$ 时的电阻值, R_0 是在温度

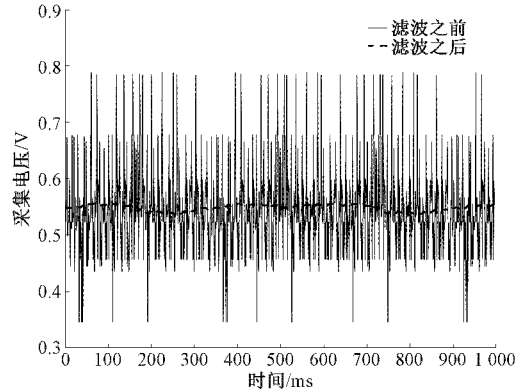


图 5 滤波算法仿真图

为 $T_0(K)$ 时的电阻值, B 为常数 3 450,温度单位为开尔文温度。

大气压采集使用 Nova 1220-030 型大气压传感器,量程为 30 psi(206.842 71 kPa),输出为 0~50 mV 的差分信号。本文采用 AD623 仪表运放将其差分信号放大并转化成单端信号。

3.3 流量控制系统设计

气溶胶光度计要求每分钟流过传感器的流量为 1 scf=0.028 317 m³≈28.3 L,即需要控制气泵吸入气溶胶的平均流量为 28.3 L/min。

本设计采用 PFM550 热式流量计作为流量传感器,其输出电压信号 1~5 V 线性对应 0~50 L/min,且不易受到温度、大气压干扰,适合本设计使用。在使用 PID 算法调制时,28.3 L/min 对应的电压值作为期望值 $r(t)$ 。此时开启气泵,流量传感器产生电信号,ADC 直接采集信号得到 $y(t)$ 。将期望值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 相减,得到 $e(t)$ 放入 PID 控制器中。误差控制器输出 $u(t)$ 值,将此值放入到 PWM 定时器中控制 PWM 的占空比,本文设定 PID 参数为: $K_p=1.2, K_i=0.2, K_d=0.06$ 。PWM 多次调整使输入误差越来越小直至整体系统达到预期效果。

3.4 参数校准系统设计

光散射值校准采用多点校准方式,采用进口高精度气溶胶光度计对本文设计仪器进行标定,将参考值与系统测量值进行逐点标定,根据不同浓度标定 9 个点,使用最小二乘法求得线性系数。最小二乘法可表示为:

$$\begin{cases} \hat{y} = a\hat{x} + b \\ a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ b = \bar{y} - a\bar{x} \end{cases} \quad (10)$$

其中, \hat{x} 为测量点电压值, \hat{y} 为电压对应质量浓度值, a 为线性比例系数, b 为截距, x_i 为第 i 次测量电压值, y_i 为第 i 次参考仪器显示的质量浓度, \bar{x} 为所有点数的电压

平均值, \bar{y} 为标准机器显示的质量浓度平均值。

3.5 基于 EasyFlash 的嵌入式数据库设计

EasyFlash 是一款轻量级 Flash 存储器库,该嵌入式数据库“键-值”操作的方式,可以直接对采集数据进行增、删、改、查等操作,让 Flash 变为非关系型数据库(NoSQL)模型的小型键值(Key-Value)存储数据库。

在本文系统中,需要对时间、上游浓度、泄漏量百分比、报警值、流量、大气压、温度、测试员 ID 和测试号进行存储。系统按照字符串形式存储,每个字符占用 1 Byte,可计算出每条数据占用约 300 Byte,计划可存储数据 30 000 条。通过设置“索引序号-时间”、“时间-数据”两对映射建立对应的键-值关系,可实现按存储顺序查询和按时间查询两种方式。在操作仪器进行数据存储时,首先存储第一组“键-值”关系,即“索引序号-时间”。数据存储键-值关系如图 6 所示,索引序号为从 00001 到 30000 按存储顺序添加。时间精确到分钟,如 2021 年 9 月 8 号 11 时 23 分,简化为 2109081123。紧接着存储第 2 对键值关系,即“时间-数据”。将第 1 组映射的“值”作为第 2 对映射的“键”,第 2 组映射的“值”则为需要存储的数据内容。在数据存储完成后将索引同时备份至 EEPROM 防止掉电丢失数据。

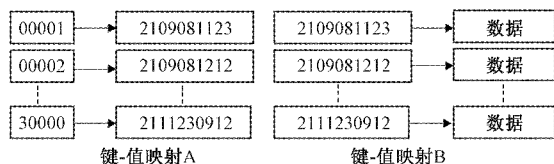


图 6 数据存储键-值关系

使用仪器进行数据查询时,如果需要进行顺序查找,则直接在界面中进行上下翻页,系统按索引倒序方式先读取第 1 组映射,再读第 2 组映射,屏幕显示存储数据。当需要进行日期查找时,输入日期的年、月、日,然后系统使用二分法对需要查询的日期进行查询定位。将当日所有数据按查询先后发送到界面进行显示,用户通过按键选择查看数据。若需要进行对特定某条数据删除时,点击“删除”,系统将 value 置为 NULL,将此条数据清空,然后将后续数据向前移一个位置,重新产生对应映射关系。

3.6 人机交互设计

本文采用迪文串口屏 DMT80480T043_01WN/WTC 作为显示和人机交互设备。该屏幕采用预制 UI 界面设计,通过串口发送地址到指定位置区域进行读写操作。气溶胶光度计主界面设计如图 7 所示。

4 实验与分析

气溶胶光度计硬件研制完成后,需获得颗粒物的质量浓度与散射光强关系,即光电倍增管输出信号与气溶胶质量浓度的关系。由于光学传感器的结构误差、光电器件的背景噪声等影响,直接计算上述关系非常困难,因此本文通过标准粒子发生器进行实验,系统各误差源直接作用于最



图 7 气溶胶光度计主界面设计

终输出电压,通过实验获得输出电压与质量浓度的线性方程系数。本文开发的气溶胶光度计实物如图 8 所示。

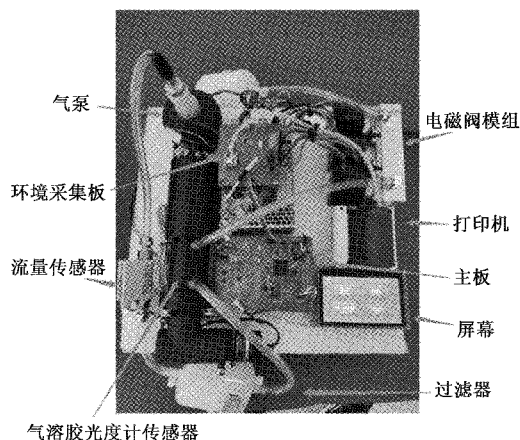


图 8 实验样机实物图

4.1 信号采集与分析

为验证传感器输出信号与被测气溶胶质量浓度关系,使用气溶胶发生器输出两路混合均匀的 PAO 气溶胶,利用 ATI-2i 作为参考仪器进行观测其测量值与传感器输出信号。通过调节 HY-AG-2AM 型气溶胶发生器输出不同浓度,使 ATI-2i 数显保持在 0~100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 量程范围内的情况下,尽可能设置多的测量点。在气溶胶发生器每个不同稳定状态时,记录 ATI-2i 光度计读数和本系统采集电压结果。电压测量值与质量浓度散布及线性拟合结果如图 9 所示,图中随着质量浓度增加,输出信号电压值增加,且明显呈线性关系。

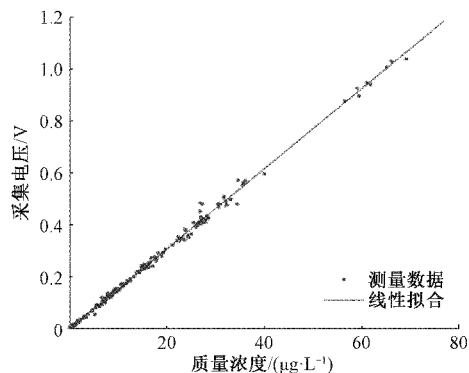


图 9 本系统采集电压值与质量浓度散布及线性拟合图

使用最小二乘法进行采集电压与质量浓度的反演可得关系式:

$$C_i = 0.0656 \times V_i - 0.3417 \quad (11)$$

其中, C_i 为质量浓度, V_i 为采集电压。

4.2 系统测试与校准

为验证本设计的校准系统对测量结果的对比偏差,选取 9 个点对系统进行校准。校准前采集数据如表 2 所示。

表 2 质量浓度反演对比实验结果

ATI-2I 读值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	本系统读值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	对应电压/ mV	对比偏差/ %
2	1.885 0	33.943	-5.75
3	2.670 0	45.910	-11.00
17	16.576 0	257.891	-2.49
18	17.155 0	266.717	-4.69
30	28.772 8	443.818	-4.09
35	34.178 6	526.224	-2.35
49	48.861 7	750.051	-0.28
70	68.844 8	1 054.672	-1.65
108	107.272 0	1 640.452	-0.67

根据测量结果对系统进行校准,使用最小二乘法校准系数,自动调整线性比例。将校准完毕的系统与 ATI-2i 型气溶胶光度计再次进行对比实验,测量结果如表 3 所示。

表 3 校准后数据对比实验

ATI-2i 读值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	本系统读值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	对应电压/ mV	对比偏差/ %
2	2.009 5	29.625	+4.6
3	3.046 5	45.419	+1.55
17	16.922 0	253.786	-0.46
18	17.213 0	159.060	-4.37
30	30.897 4	465.913	-2.9
35	34.393 8	518.882	-1.73
49	48.500 2	732.945	+0.2
70	69.511 4	1 052.283	-0.7
108	108.584 0	1 657.841	+0.541

系统校准前后测量实验结果如图 10 所示。

如图 10 所示,本系统经过校准参数后,对比误差减小,且能保持在 $\pm 5\%$ 以内,符合《气溶胶光度计校准规范 JJF1800-2020》里所提“质量浓度示值误差 10~100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 误差不得超过 $\pm 20\%$ ”的要求。

调整气溶胶发生器的输出浓度,使用 ATI-2i 气溶胶光度计测量其结果分别稳定在 0.6、20、100 $\mu\text{g}/\text{L}$,将校准后的系统接入进行重复性验证。本系统对 3 种不同浓度分别进行 6 次采集,每隔 1 min 进行一次采集,采集数据记录结果如表 4 所示。

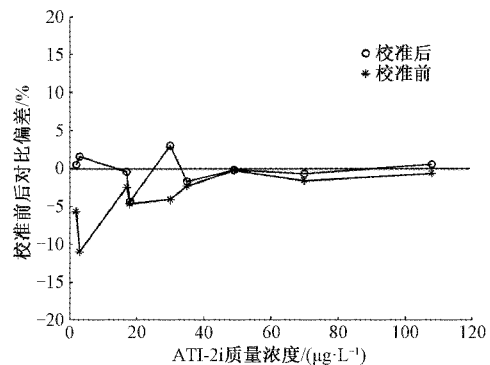


图 10 系统校准前后对比偏差

表 4 参考值为固定值时系统重复采样值 $\mu\text{g}/\text{L}$

0.6 $\mu\text{g}/\text{L}$	20 $\mu\text{g}/\text{L}$	100 $\mu\text{g}/\text{L}$
0.635	19.983	98.735
0.654	20.452	100.754
0.615	20.053	99.854
0.622	19.872	99.675
0.643	19.976	100.443
0.606	20.112	100.641

有重复性公式:

$$S_{r,c} = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (C_i - \bar{C})^2}{5}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $S_{r,c}$ 为重复性, \bar{C} 为质量浓度平均测量值, C_i 为某次测量值。

由式(12)可得出在对比仪器测量值为 0.6 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时,计算得到 $S_{r,c} = 2.9\%$; 20 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时, $S_{r,c} = 1.01\%$; 100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时, $S_{r,c} = 0.76\%$ 。该结果符合《气溶胶光度计校准规范 JJF1800-2020》里所提“质量浓度重复性在低浓度(0.01~1) $\mu\text{g}/\text{L}$ 不大于 5%,高浓度(10~100) $\mu\text{g}/\text{L}$ 不大于 3%”的要求。

5 结 论

本文采用了光学前向散射的颗粒群法开发了一套气溶胶光度计。针对微弱光信号采集精度要求高的难点,本文使用光电倍增管与跨阻放大器设计了信号采集电路,实现了微弱光电信号精确测量。流量控制直接影响计算结果,为了保证其准确性,本文设计了气体流量控制系统将其控制在 28.3 L/min。考虑不同仪器组装的微小差异,本文设计了基于最小二乘法的多点校准功能可进行系数精准修正。最后基于本文设计的气溶胶光度计与美国 ATI-2i 光度计对雾化后的 PAO 油气溶胶进行测量实验,实验结果表明,本文开发的气溶胶光度计符合《气溶胶光度计校准规范 JJF1800-2020》里所提“质量浓度示值误差 10~100 $\mu\text{g}/\text{L}$ 误差不得超过 $\pm 20\%$ ”,“质量浓度重复性在低浓度(0.01~1) $\mu\text{g}/\text{L}$

不大于5%,高浓度(10~100) $\mu\text{g}/\text{L}$ 不大于3%”的要求。本文开发的气溶胶光度计与ATI-2i光度计最大示值偏差接近 $\pm 5\%$,仍有改进空间,后期可以在电路抗干扰以及信号处理算法方面进一步深入研究,实现与进口光度计相同水平的测量精度。在疫情防控物资需求和仪器国产化需求的大背景下,本设计有助于仪器国产化的推进,具有较好推广价值与实际工程意义。

参考文献

- [1] 李辰宇,程智,陈锋,等.基于LabVIEW的大气气溶胶实时监测系统[J].电子测量技术,2015,38(6):87-91.
- [2] 韦圆圆.高精度光散射式气溶胶质量浓度测量系统研制[D].南京:南京信息工程大学,2016.
- [3] 赵也.电厂压缩空气质量检测的现状与进展[J].安徽化工,2020,46(6):13-16.
- [4] 张加宏,韦圆圆,顾芳,等.高精度光散射气溶胶质量浓度测量系统的信号处理研究[J].传感技术学报,2016,29(4):536-544.
- [5] 吴丽霞.基于尘埃粒子计数器信号幅度分布函数的叠加及应用[D].南京:南京理工大学,2010.
- [6] 明虎,王敏仲,刘新春,等.基于Grimm180粒子仪对塔克拉玛干沙漠沙尘暴的定量观测[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):26-33.
- [7] DEARY M E, BAINBRIDGE S J, KERR A, et al. Practicalities of mapping PM10 and PM2.5 concentrations on city-wide scales using a portable particulate monitor[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2016, 9(8): 923-930.
- [8] 江静枝.基于光散射法的颗粒浓度检测系统研制[D].南京:东南大学,2018.
- [9] 徐婷婷.基于自适应测量功能粉尘浓度测量仪的设计与实现[D].苏州:苏州大学,2012.
- [10] 孙吉勇,梁凤飞,沈玮栋,等.基于激光暗场技术的气溶胶光度计研制[J].中国仪器仪表,2019(2):53-56.
- [11] 肖骥,池顺鑫,杨古涵,等.气溶胶光度计校准技术研究[J].计量科学与技术,2020(11):48-52.
- [12] 张爱亮,刘悦,陈启悦,等.一种气溶胶光度计质量浓度的校准方法[J].计量学报,2020,41(6):765-768.
- [13] BS EN 1822-2-2009, 高效空气过滤器(HEPA和ULPA).气溶胶产品、测量设备、颗粒计数统计[Z]. 2010-01-31.
- [14] 徐化超.基于前向散射的粉尘浓度信号测量方法研究[D].青岛:山东科技大学,2019.
- [15] KRAUS M, SENITKOVA I J. Particulate matter mass concentration in residential prefabricated buildings related to temperature and moisture[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 245(4): 042068.
- [16] 梁志清,石锦涛,张铭.一种基于TDLAS的气体浓度检测方法:CN108709871B[P]. 2020-12-08.
- [17] ANGELA B, PABLO A, FERNANDO M, et al. Broadband unidirectional forward scattering with high refractive index nanostructures: Application in solar cells [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(15): 4421.
- [18] 姜万录,雷亚飞,代皓东,等.湿度修正的光散射法在现场粉尘监测中的应用[J].仪器仪表学报,2018,39(1): 200-207.
- [19] 张彦斌.基于前向散射激光雷达的PM2.5浓度反演机制研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2020.
- [20] 杨效,于志伟,王大伟,等.基于激光散射的大气颗粒物测量[C].环境工程2017增刊2,2017:351-353.
- [21] 潘力,付威威,尹焕才,等.基于光电倍增管的微弱光检测装置:CN210124759U[P]. 2020-03-06.
- [22] 李辉,刘鲲.一种应用于微型气体流量计的低噪声信号采集系统[J].传感器与微系统,2012,31(11):81-83.
- [23] 孟显.基于无线传输技术的温度测量仪器的设计与实现[D].保定:华北电力大学,2015.
- [24] 文常保,高丽红,方吉善,等.基于改进型限幅平均滤波法的高精度称重系统研究[J].传感技术学报,2014, 27(5):649-653.

作者简介

张白,副教授,主要研究方向为现代精密测控技术与仪器研究、人工智能算法研究。

E-mail: zhangbai6402@163.com

王鹤,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式与智能控制。

E-mail: 1446537120@qq.com